

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Ville Viikari

Kompaktin antennimittauspaikan epäideaalisuudet

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 16.3.2004

Työn valvoja



Professori Antti Räisänen

Työn ohjaaja



TkL Janne Häkli

| | |
|---|---|
| Tekijä: | Ville Viikari |
| Työn nimi: | Kompaktin antennimittauspaikan epäideaalisuudet |
| Päivämäärä: | 15.3.2004 Sivumäärä: 66 |
| Osasto: | Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto |
| Professuuri: | S-26 Radiotekniikka |
| Työn valvoja: | Professori Antti Räisänen |
| Työn ohjaaja: | TkL Janne Häkli |
| <p>Tämän diplomityön kirjallisuuskatsauksessa tutkittiin kompakteihin antennimittauspaikkoihin kehitettyjä häiriöiden tunnistus- ja korjausmenetelmiä, sekä arvioitiin niiden sopivuutta millimetri- ja alimillimetriaaltoalueelle. Menetelmien avulla voidaan parantaa antennimittauspaikkaa ja mittaustarkkuutta.</p> <p>Tutkittujen menetelmien avulla analysoitiin ADMIRALS RTO-antennin mittauksia hologrammiin perustuvassa kompaktissa antennimittauspaikassa. Mittauspaikan hiljaisesta alueesta löydettiin vaakatasossa suunnasta 6°...8° tuleva häiriösignaali, joka näkyi myös antennin mitatussa suuntakuviossa. Työssä arvioitiin mitatun hiljaisen laadun vaikutusta mitattuun suuntakuvioon. Simulointien perusteella mitattu epäideaalinen hiljainen alue laskee ADMIRALS RTO:n simuloidun pääkeilan olkapäitä enimmillään 3 dB atsimuuttitasossa. Elevaatiotasossa -3 dB:n keilanleveys kasvaa 26 % epäideaalisen hiljaisen alueen vaikutuksesta. Parhaiten hiljaisen alueen vaikutus näkyy kaksiulotteisissa suuntakuvioissa. Epäideaalisen hiljaisen alueen vaikutuksesta simuloidun pääkeilan muoto vääristyy mitatun elliptisen pääkeilan kaltaiseksi. Mitatulla hiljaisen alueen kentällä on huomattava vaikutus mitattavan antennin suuntakuvioon.</p> <p>Lisäksi tutkittiin tasoaallon erilaisten epäideaalisuuksien vaikutusta antennin mitattuun suuntakuvioon. Esimerkiksi hiljaisen alueen amplitudissa oleva kupu levantää mitattua pääkeilaa ja laskee sivukeilatasoa, amplitudissa oleva kuoppa puolestaan kaventaa mitattua pääkeilaa ja nostaa sivukeilatasoa. Hiljaisen alueen vaiheessa olevat häiriöt täyttävät suuntakuvion minimejä.</p> <p>Avainsanat: hologrammiin perustuva kompakti antennimittauspaikka, alimillimetri-aallot, häiriöiden tunnistus</p> | |

alueen

| | | |
|--|---|---------------------|
| Author: | Ville Viikari | |
| Name of Thesis: | Non-idealities of a compact antenna test range | |
| Date: | 15 March 2004 | Number of pages: 66 |
| Department: | Department of Electrical and Communications Engineering | |
| Professorship: | S-26 Radio Engineering | |
| Supervisor: | Antti Räisänen, Professor | |
| Instructor: | Janne Häkli, Lic.Sc. (Tech.) | |
| <p>Several methods have been developed for microwave frequencies that can be used to analyze compact antenna test ranges and to compensate the effect of the quiet zone field distortions. The theoretical part of this thesis investigates these methods and discusses their suitability for submillimetre wave region.</p> <p>In the experimental part of the thesis submillimetre wave antenna measurement in the hologram based antenna test range is analyzed. A spurious signal occurred in the quiet zone of the test range. The signal came from the $6^{\circ}\dots 8^{\circ}$ direction in the horizontal plane. The impact of quiet zone quality on antenna measurement was analyzed. Simulations revealed that the non-ideal quiet zone caused a 3 dB decrease in the shoulders of the simulated main lobe in the horizontal plane, and a 26 % broadening of the -3 dB beam width in the vertical direction. Computed two-dimensional directional patterns show best the impact of the non-ideal quiet zone on the directional pattern. The simulated main lobe becomes similarly shaped as the measured elliptical main lobe.</p> <p>The effects of some common non-ideal properties of the quiet zone field on the measured directional pattern were analyzed. For example, the convex amplitude of the quiet zone broadens the measured main lobe and decreases the measured side lobe level. On the contrary, the concave amplitude of the quiet zone field narrows the measured main lobe and increases the measured side lobe level. The non-ideal quiet zone phase mainly fills the minimums in directional pattern.</p> | | |
| Keywords: hologram-based compact antenna test range, CATR, submillimetre waves, spurious signals | | |

Alkulause

Kiitän työn valvojaa, professori Antti Räisästä mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta tehdä diplomityö Teknillisen korkeakoulun radiolaboratoriossa. Työn ohjaajaa, TkL Janne Häkliä kiitän diplomityöni väsymättömästä ohjaamisesta ja hyvistä neuvoista. Jannea kiitän myös ADMIRALS RTO-antennin simuloimisesta. Diplomityössä on käytetty koko hologrammiryhmän mittaamia tuloksia. Kiitos koko ryhmälle neuvoista, mukavasta työilmapiiristä ja saamastani avusta. Lopuksi haluan kiittää tyttöystävääni Meri Liesiötä kannustuksesta ja tuesta.

Espoossa 15.3.2004



Ville Viikari

Sisällysluettelo

- TIIVISTELMÄ 2
- ABSTRACT 3
- ALKULAUSE 4
- SISÄLLYSLUETTELO..... 5
- SYMBOLILUETTELO 7
- LYHENNELUETTELO 9
- 1 JOHDANTO10
- 2 ANTENNIMITTAUSMENETELMÄT12
 - 2.1 KAUKOKENTTÄMITTAUS 12
 - 2.2 LÄHIKENTTÄMITTAUS13
 - 2.3 KOMPAKTIT ANTENNIMITTAUSPAIKAT14
 - 2.3.1 Heijastimeen tai linssiin perustuvat kompaktit antennimittauspaikat14
 - 2.3.2 Hologrammiin perustuva kompakti antennimittauspaikka15
- 3 HEIJASTINANTENNIT17
 - 3.1 ANTENNITEORIAA17
 - 3.1.1 Virtajakauman säteily.....17
 - 3.1.2 Lähikenttä-kaukokenttä-muunnos.....18
 - 3.1.3 Antennien peruskäsitteitä18
 - 3.2 HEIJASTINANTENNIRAKENTEITA19
- 4 HILJAISEN ALUEEN HÄIRIÖIDEN TUNNISTAMINEN21
 - 4.1 HÄIRIÖLÄHTEET JA NIIDEN VAIKUTUS ANTENNIN SUUNTAKUVION MITTAUKSISSA.....21
 - 4.2 TASOAALTOKEHITELMÄT23
 - 4.2.1 Fourier-muunnos.....23
 - 4.2.2 MUSIC-algoritmi24
 - 4.2.3 Ikkunointi25
 - 4.2.4 Pääkeilan suodatus25
 - 4.2.5 TCD-menetelmä.....25
 - 4.3 KÄÄNTEINEN KONVOLUUTIO26
 - 4.4 FRESNELIN ALUEEN MUUNNOS.....27
 - 4.5 NAPC-MENETELMÄ27
 - 4.6 VIRTUAALISEEN ANTENNIRYHMÄÄN PERUSTUVA MENETELMÄ.....29
 - 4.7 PALLOAALTOKEHITELMIIN PERUSTUVAT MENETELMÄT30
 - 4.8 MITTAUKSET AIKA- TAI TAAJUUSALUEESSA30

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | HÄIRIÖIDEN TUNNISTAMINEN JA HILJAISEN ALUEEN LAADUN VAIKUTUS | |
| | MITATTUUN SUUNTAKUVIOON | 32 |
| 5.1 | TCD-MENETELMÄN JA PÄÄKEILAN SUODATUKSEN SIMULOINTI..... | 32 |
| 5.1.1 | Pääkeilan suodatus | 33 |
| 5.1.2 | TCD-menetelmä..... | 34 |
| 5.2 | HILJAISEN ALUEEN EPÄIDEAALISUUDEN VAIKUTUS ANTENNIMITTAUKSISSA | 35 |
| 5.2.1 | Testitapauksen antenni | 35 |
| 5.2.2 | Hiljaisen alueen epäideaalisen amplitudin vaikutus | 36 |
| 5.2.3 | Hiljaisen alueen epäideaalisen vaiheen vaikutus..... | 40 |
| 5.2.4 | Hiljaisessa alueessa olevan jaksollisen häiriön vaikutus | 42 |
| 6 | ADMIRALS RTO-ANTENNIN MITTAUSTEN ANALYSOINTI | 45 |
| 6.1 | MITTAUSJÄRJESTELY JA SUORITETUT MITTAUKSET | 45 |
| 6.1.1 | Mittausgeometria ja koordinaatisto | 45 |
| 6.1.2 | Hologrammi..... | 46 |
| 6.1.3 | Hiljaisen alueen skanneri ja antennipyörä | 47 |
| 6.1.4 | RF-instrumentointi..... | 49 |
| 6.2 | HILJAISEN ALUEEN ANALYSOINTI..... | 49 |
| 6.2.1 | Mitattu hiljainen alue | 49 |
| 6.2.2 | Hiljaisen alueen tasoaaltospektri..... | 50 |
| 6.2.3 | Hiljaisen alueen kaksiuotteisen kentän laskeminen mitattujen leikkausten perusteella..... | 52 |
| 6.2.4 | Mittauspaikan häiriötason simulointi säteenseurantaan perustuvalla ohjelmalla | 53 |
| 6.3 | ADMIRALS RTO:N SUUNTAKUVION MITTAAMINEN..... | 55 |
| 6.3.1 | ADMIRALS RTO-antenni | 55 |
| 6.3.2 | ADMIRALS RTO:n mitattu suuntakuvio..... | 55 |
| 6.3.3 | ADMIRALS RTO:n simuloidut suuntakuviot | 57 |
| 6.4 | JOHTOPÄÄTÖKSET ANTENNIMITTAUKSESTA..... | 60 |
| 6.4.1 | Mittauspaikan häiriöiden tunnistaminen..... | 60 |
| 6.4.2 | Hiljaisen alueen laadun vaikutus ADMIRALS RTO:n mitattuun suuntakuvioon..... | 61 |
| 6.4.3 | Kompaktin antennimittauspaikan mittauksarkkuuden parantaminen | 61 |
| 7 | YHTEENVETO | 62 |
| | LÄHDELUETTELO | 64 |

Symboliluettelo

| | |
|--|---|
| A | antennin todellinen suuntakuvio |
| \mathbf{A} | kerroinmatriisi |
| \vec{A} | vektoripotentiaali [A] |
| A_{ef} | antennin efektiivinen pinta-ala [m ²] |
| \mathbf{a} | aallon tulosuunnasta riippuva vektori |
| D | antennin suurin halkaisija [m], suuntaavuus, tasoaaltojen lukumäärä |
| d | näytepisteiden välinen matka [m] |
| \vec{E} | sähkökentän voimakkuus [V/m] |
| \vec{E}_{ant} | antennin apertuurin sähkökentän voimakkuus [V/m] |
| \vec{E}_d | tasoaallon sähkökentän voimakkuus [V/m] |
| \mathbf{E}_N | matriisi, jonka sarakkeet ovat kohinaan liittyvät ominaisvektorit |
| \vec{E}_{qz} | mittauspaikan sähkökentän voimakkuus antennin apertuurissa [V/m] |
| \vec{E}_r | häiriösignaalin sähkökentän voimakkuus [V/m] |
| $\vec{E}_{t1}, \vec{E}_{t2}, \vec{E}_{t3}$ | sähkökentän voimakkuudet pisteissä 1, 2 ja 3 [V/m] |
| F | antennin mitattu suuntakuvio |
| \mathbf{F} | tulevat signaalit |
| \tilde{F} | etäisyydellä d mitattu suuntakuvio |
| F_c | antennin korjattu suuntakuvio |
| F_e | suuntakuvion mittausvirhe |
| $F_{e,max}$ | suuntakuvion suurin mahdollinen mittausvirhe |
| f | taajuus [Hz] |
| f_H, f_L | korkein ja matalin taajuus [Hz] |
| G | antennin vahvistus |
| g | ikkunafunktio |
| \vec{H} | magneettikentän voimakkuus [A/m] |
| \vec{J} | sähköinen virrantiheys [A/m ³] |
| j | imaginääriyksikkö |
| k | aaltoluku [1/m] |
| \vec{k} | aaltovektori [1/m] |

| | |
|-------------------|---|
| k_{res} | aaltolukuresoluutio [1/m] |
| k_x | aaltoluvun x -suuntainen komponentti [1/m] |
| k_y | aaltoluvun y -suuntainen komponentti [1/m] |
| M | näytepisteiden lukumäärä MUSIC-algoritmissa |
| N | näytepisteiden lukumäärä |
| P | näytteenottoantennin suuntakuvio |
| \mathbf{P} | MUSIC-algoritmiin liittyvä matriisi |
| \mathbf{P}_{MU} | MUSIC-algoritmillä laskettu spektritiheys [W/rad] |
| P_n | normalisoitu suuntakuvio |
| R | etäisyys [m] |
| \vec{r} | kenttäpisteen paikkavektori [m] |
| \vec{r}' | integrointimuuttuja [m] |
| S | mittauspaikan tehon suuntaspektri [W/rad] |
| \mathbf{S} | kovarianssimatriisi |
| T | antennin vaste |
| T_G | aikaikkunan pituus [s] |
| T_{pulssi} | pulssin pituus [s] |
| V | virtajakauman tilavuus [m ³] |
| \mathbf{W} | kohina |
| X | pulssin spektri [W/Hz] |
| \mathbf{X} | näytteistetyt signaalit |
| x, y | paikkakoordinaatit [m] |
| Y | antennin taajuusvaste pulssiin |
| y | antennin aikavaste pulssiin |
| Z | antennin korjattu taajuusvaste |
| z | antennin ikkunoitu aikavaste |
| α | häiriösignaalin tulosuunta [rad] |
| Δf | taajuusväli [Hz] |
| ϵ | permittiivisyys [As/Vm] |
| ϵ_r | suhteellinen permittiivisyys |
| η_r | antennin säteilyhyötysuhde |
| λ | aallonpituus [m] |

| | |
|------------------|--|
| λ_{\min} | pienin nollaa suurempi ominaisarvo |
| θ | atsimuuttikulma [rad] |
| θ_{\max} | suurin kulman arvo, jolla antennin säteilykuvio voidaan laskea [rad] |
| μ | permeabiliteetti [Vs/Am] |
| ϕ | elevaatiokulma [rad] |
| ω | kulmataajuus [rad/s] |

Lyhenneluettelo

| | |
|-------|---|
| AAPC | Advanced Antenna Pattern Comparison, kehittynyt antennin suuntakuvioiden vertailu |
| APC | Antenna Pattern Comparison, antennin suuntakuvioiden vertailu |
| CATR | Compact Antenna Test Range, kompakti antennimittauspaikka |
| FFT | Fast Fourier Transform, nopea Fourier-muunnos |
| IFFT | Inverse Fast Fourier Transform, käänteinen nopea Fourier-muunnos |
| MUSIC | Multiple Signal Classification, usean signaalin luokittelu |
| NAPC | Novel Antenna Pattern Comparison, uusi antennin suuntakuvioiden vertailu |
| RTO | Representative Test Object, kuvaava testikappale |
| TCD | Translation Corrected Data, siirtymäkorjattu näyte |

1 Johdanto

Maata, ja sen ilmakehää tutkivissa kaukokartoitussatelliiteissa ja avaruutta tutkivissa radioastronomisissa satelliiteissa käytetään yleensä millimetriaaltoalueella toimivia suurikokoisia heijastinantenneja. Esimerkiksi Euroopan avaruusjärjestöllä on tarkoitus lähettää alimillimetriaaltoalueella toimivat Planck- ja Herschel-luotaimet avaruuteen vuonna 2007. Planck-luotaimen antennin pääheijastimen halkaisija on 1,5 metriä ja Herschel-luotaimen peilin halkaisija 3,5 metriä.

Satelliiteissa käytettävien antennien toimivuus tulisi testata ennen laukaisua. Antennin sähköinen mittaaminen on paras tapa varmistua antennin toimivuudesta. Suurikokoisten millimetri- ja alimillimetriaaltoalueen antennien sähköinen testaaminen on kuitenkin erittäin haastavaa. Kaukokenttämittausta ei voida käyttää vaadittavan mittausetäisyyden, ilmakehän vaimennuksen ja häiriöiden vuoksi. Lähikenttämittauksissa ongelmaksi muodostuu pitkä mittausaika ja sen edellyttämä mittauslaitteiston hyvä stabiilisuus. Antenneja on testattu hologrammiin [1] ja heijastimeen [2] perustuvissa kompakteissa antennimittauspaikoissa. Heijastimen suurinta käyttötaajuutta rajoittaa sen pinta-tarkkuus. Hologrammin pintatarkkuusvaatimus on lievempi. Lisäksi hologrammi on planaarisena rakenteena edullinen valmistaa.

Suuren, alimillimetriaaltoalueella toimivan antennin suuntakuvion mittaaminen kompaktissa antennimittauspaikassa on vaativaa. Tämän diplomityön teoreettisessa osassa perehdytään olemassa oleviin kompaktin antennimittauspaikan häiriöiden tunnistamiseen ja mittaustulosten tarkentamiseen tarkoitettuihin menetelmiin. Menetelmien soveltuvuutta alimillimetriaaltoalueelle arvioidaan. Käytännöllisempänä osana työssä tarkastellaan EADS Astriumien valmistaman ADMIRALS RTO-satelliittiantennin mittauksia hologrammiin perustuvassa kompaktissa antennimittauspaikassa. Työn tavoitteena on arvioida kompaktin antennimittauspaikan tasoaallon laadun vaikutusta antennin mitattuun suuntakuvioon ja mittaustarkkuuteen. Tämän lisäksi mittauspaikan tasoaallosta yritetään erottaa erilaiset häiriösignaalit ja epäideaalisuudet sekä paikallistaa niiden aiheuttajat.

Luvussa 2 esitellään tavallisimmat antennin suuntakuvion mittaamiseen soveltuvat menetelmät. Luvussa 3 käsitellään antennien peruskäsitteitä sekä esitellään tavallisimpia heijastinantennirakenteita. Luvussa 4 kerrotaan kompakteihin antennimittauspaikkoihin kehitetyistä menetelmistä, joiden avulla voidaan tunnistaa häiriöitä sekä parantaa mittauksen tarkkuutta. Luvussa 5 tutkitaan tavallisimpien hologrammiin perustuvassa kompaktissa antennimittauspaikassa olevien epäideaalisuuksien vaikutuksia antennin mitattuun suuntakuvioon. Luvussa 6 tarkastellaan ADMIRALS RTO-antennin

mittauksia hologrammiin perustuvassa kompaktissa antennimittauspaikassa. Yhteenveto on luvussa 7.

2 Antennimittausmenetelmät

Tavallisesti antennit on tarkoitettu toimimaan kaukana toisistaan, jolloin lähetysantennin säteilemän pallomaisen vaiherintaman vaihe ja amplitudi ovat lähes vakioita vastaanottoantennin apertuurin alueella. Antennien mittaamiseksi on kehitetty erilaisia menetelmiä tällaisen tasomaisen aaltorintaman eli tasoaallon luomiseksi. Seuraavassa esitellään joitakin menetelmiä antennin suuntakuvion mittaamiseksi sekä tarkastellaan niiden etuja ja haittoja mitattaessa suuntaavia millimetri- ja alimillimetriaaltoalueella toimivia antenneja.

2.1 Kaukokenttämittaus

Kaukokenttämittauksessa testattava antenni on niin kaukana mittausantennista, että mittausantennin säteilemää pallomaista vaiherintamaa voidaan pitää tasoaaltona testattavan antennin apertuurin alueella. Testattavan antennin suuntakuvio saadaan selville pyörittämällä sitä tasoaallossa ja mittaamalla vastaanotettu teho eri kiertokulman arvoilla. Vaadittava antennien välinen etäisyys riippuu aallonpituudesta, vastaanottavan antennin koosta sekä halutusta mittaustarkkuudesta. Tavallisesti kaukokentän rajana eli vaadittavana antennien välisenä pienimpänä etäisyytenä pidetään etäisyyttä

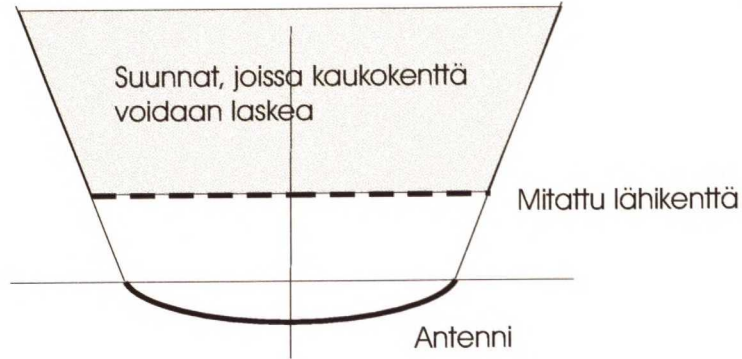
$$R = 2D^2/\lambda, \quad (2.1)$$

jossa D on vastaanottavan antennin suurin halkaisija ja λ on aallonpituus. Edellistä rajaa käytettäessä vastaanottavan antennin apertuurin alueella on enintään $22,5^\circ$ vaihero. Voimakkaasti suuntaavia heijastinantenneita mitattaessa on etäisyyden oltava vieläkin suurempi, tavallisesti $4D^2/\lambda$ tai $8D^2/\lambda$ [3].

Antennin ollessa suuri ja aallonpituuden ollessa pieni, on tarvittava etäisyys epäkäytännöllisen suuri. Jos esimerkiksi 1 THz:n taajuudella toimivan antennin apertuurin halkaisija $D = 1$ m, vaadittava etäisyys on vähintään $R = 6,7$ km. Suurempi ongelma alimillimetriaalloilla on kuitenkin ilmakehän vaimennus, joka voi olla kymmenistä satoihin desibeleihin kilometrillä. Lisäksi ilman lämpötilagradientti ja kosteusvaihtelut voivat aiheuttaa lyhytkestoisia vaimennuksen muutoksia. Näiden syiden vuoksi suurten heijastinantenneiden kaukokenttämittaukset ovat käytännössä mahdottomia alimillimetriaaltoalueella [4].

2.2 Lähikenttämittaus

Lähikenttämittauksessa mitataan tutkittavan antennin säteilemän sähkökentän amplitudi, polarisaatio ja vaihe vähintään muutaman aallonpituuden etäisyydellä antennista [5]. Mitatusta kentästä lasketaan antennin kaukokenttäominaisuudet. Antennin säteilemä kenttä on mitattava ainakin niin suurelta alueelta, että alue peittää tutkittavan antennin täysin niistä suunnista, joissa antennin kaukokenttää tarkastellaan (kuva 2-1).



Kuva 2-1. Suunnat, joissa kaukokenttä voidaan laskea mitatusta lähikentästä.

Tavallisesti lähikenttä mitataan tutkittavan antennin edestä tasolta tai tutkittavan antennin ympäriltä pallopinnalta. Pallopinnalta mitattaessa mitta-alue peittää antennin joka suunnasta, jolloin antennin säteilykuvio saadaan laskettua kaikissa suunnissa. Yleensä ympärisäteilevien antennien lähikenttä mitataan pallopinnalta. Mikäli halutaan tietää antennin säteily vain tiettyyn suuntaan, riittää mittaus tarpeeksi suurelta tasolta antennin edestä. Tasolta mitattaessa näytteenottoantennia liikutetaan kahteen suuntaan liikkuvalla lineaarisiirtimellä. Pallopinnalta mitattaessa tutkittavaa antennia tavallisesti käännetään kahdella pyörittimellä ja näytteenottoantenni pidetään paikallaan. Koska myös lähikentän polarisaatio on tiedettävä, on mittaukset tehtävä kahteen kertaan ortogonaalisilla polarisaatioilla tai käytettävä kahta antennia, joilla on ortogonaalinen polarisaatio.

Mittauspisteiden välisen etäisyyden d on oltava pienempi kuin

$$d \leq \frac{\lambda}{2 \sin(\theta_{\max})}, \quad (2.2)$$

jossa θ_{\max} on suurin kulma, jossa suuntakuvio halutaan laskea. Säteilykuvion alue $\theta > \theta_{\max}$ laskostuu alueelle $\theta < \theta_{\max}$. Mittauspisteen paikan tarkkuuden on oltava vähintään $\lambda/100$ [5]. Antennin lähikentästä lasketaan Fourier-muunnoksella suuntaspektri, josta saadaan antennin kaukokentän säteilykuvio. Heijastusten eliminoinemiseksi mittauspaikka tulisi sijoittaa heijastuksettomaan huoneeseen. Erityisesti

mitattavan antennin ja näyttöantennin väliset moninkertaiset heijastukset tulisi eliminoida.

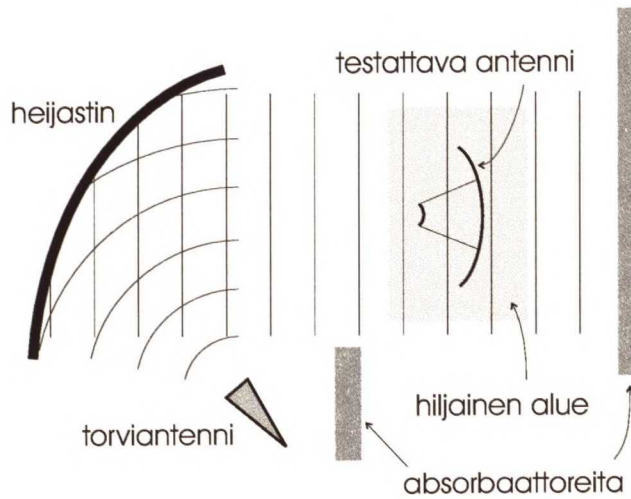
Korkeilla taajuuksilla lähikenttämittauksen ongelmiksi muodostuvat kaapeleiden taipumisesta johtuvat vaiheen vääristymät, mittauspajan epätarkkuudet sekä mittauspisteiden suuri määrä. Mittaustietojen suuren määrän vuoksi kaukokenttämuunnoksessa tarvitaan jonkin verran laskentatehoa. Suurempi ongelma on kuitenkin mittausajan pidentyminen [6], joka asettaa laitteiden stabiilisuudelle tiukat vaatimukset. Esimerkiksi mitattaessa taajuudella 500 GHz toimivan, halkaisijaltaan 1 m olevan antennin lähikenttä tasolta, joka on 1,2-kertainen antennin apertuuriin nähden, tarvitaan noin 16 miljoonaa mittaustietoa mittaustietojen välin ollessa $\lambda/2$. Mikäli mitataan 30 näyttöä sekunnissa, kuluu mittaukseen 6 päivää [6].

2.3 Kompaktit antennimittauspaikat

Kompaktissa antennimittauspaikassa (CATR, Compact Antenna Test Range) tasoaalto luodaan lyhyellä etäisyydellä linssin, peilin tai hologrammin avulla palloaallost. Tutkittavan antennin suuntakuvio saadaan kaukokenttämittauksen tapaan selville pyörittämällä antennia tasoaaltokentässä. Etuna kaukokenttämittaukseen on mittauspaikan pieni koko. Tällöin mittaus voidaan suorittaa kontrolloiduissa olosuhteissa lyhyellä matkalla, jolloin vaimennus pysyy kohtuullisena ja ulkopuoliset häiriöt voidaan eliminoida. Antennimittauksen tarkkuuteen vaikuttaa luodun tasoaallon laatu. Tavallisesti vaaditaan, että amplitudin vaihtelu on alle 1 dB ja vaiheen vaihtelu alle 10° huipusta huippuun. Aluetta, jossa asetetut tasoaallon vaatimukset täyttyvät, kutsutaan hiljaiseksi alueeksi.

2.3.1 Heijastimeen tai linssiin perustuvat kompaktit antennimittauspaikat

Tavallisimmin kompaktit antennimittauspaikat perustuvat yhteen tai useaan heijastimeen. Heijastimeen perustuvan kompaktin antennimittauspaikan periaate on esitetty kuvassa 2-2.



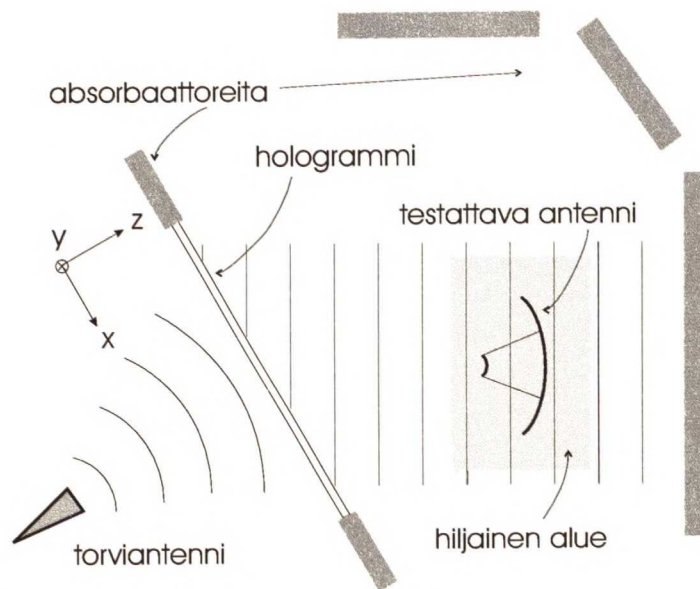
Kuva 2-2. Heijastimeen perustuvan kompaktin antennimittauspaikan periaate.

Heijastimella toteutetun kompaktin antennimittauspaikan pienimmän käyttötaajuuden määrää lähinnä heijastimen reunadiffraktio [7] ja suurimman heijastimen pintatarkkuus. Heijastimen pintatarkkuuden on oltava noin $\lambda/100$, jolloin vaihevirhe hiljaisella alueella on alle $7,2^\circ$. Koska linssi on läpäisytyyppinen elementti, on sen pintatarkkuusvaatimus tavallisesti pienempi (lievempi kertoimella $(\sqrt{\epsilon_r} - 1)/\sqrt{2}$). Pienennettäessä linssin suhteellista permittiivisyyttä ϵ_r , lievenee pintatarkkuusvaatimus, mutta samalla linssin paksuus kasvaa. Yhteen heijastimeen perustuvissa kompakteissa antennimittauspaikoissa hiljaisen alueen koko on noin 30 % heijastimen koosta ja kahteen heijastimeen perustuvissa mittauspaikoissa hiljaisen alueen koko on noin 60 % pääheijastimen koosta. Linssiin perustuvissa kompakteissa antennimittauspaikoissa hiljaisen alueen koko on noin 60 % linssin koosta.

Heijastimeen ja linssiin perustuvien kompaktien antennimittauspaikkojen etuna on riippumattomuus käytetystä polarisaatiosta ja laaja taajuuskaista. Korkeilla taajuuksilla heijastimen käyttöä rajoittaa sen pintatarkkuusvaatimus. Heijastimeen perustuvia mittauspaikkoja on rakennettu taajuudelle 200 GHz asti. Suurilla taajuuksilla linssin käytön suurin ongelma on tarpeeksi rakeettoman ja tasalaatuisen materiaalin löytäminen.

2.3.2 Hologrammiin perustuva kompakti antennimittauspaikka

TKK:n radiolaboratoriossa on tutkittu hologrammiin perustuvaa kompaktia antennimittauspaikkaa. Hologrammiin perustuvassa kompaktissa antennimittauspaikassa tasoaalto luodaan palloaallostaa hologrammin avulla (kuva 2-3).



Kuva 2-3. Hologrammiin perustuvan kompaktin antennimittauspaikan periaate.

Hologrammina on käytetty binääristä läpäisytyyppistä amplitudihologrammia. Hologrammi on valmistettu etsaamalla ohuen dielektrisen kalvon päällä olevaan kuparikalvoon hologrammikuviointi, joka on tasoaallon ja palloaallon interferenssikuvio. Hologrammi on saatu tasomaiseksi pingottamalla se kehykseen. Hologrammin kuvion tarkkuusvaatimus on noin $\lambda/50 - \lambda/100$ [8]. Hiljaisen alueen koko on tyypillisesti 50–60 % hologrammin koosta.

Hologrammin haittapuolina on sen kapeakaistaisuus ja polarisaatioriippuvuus. Lisäksi hologrammin ristipolarisaatiotaso on suhteellisen korkea, jolloin antennin ristipolarisaatiotason mittaaminen on epätarkkaa. Hologrammiin perustuva kompakti antennimittauspaikka on kuitenkin edullinen peiliin perustuvaan mittauspaikkaan verrattuna, ja se on helppo rakentaa mitattavan antennin luo. Myöskään hologrammin kapeakaistaisuus ei ole ongelma satelliittiantenneja mitattaessa, koska mittaukset suoritetaan yleensä vain yhdellä pistemäisellä taajuudella kerrallaan. Tällä hetkellä suurin haaste liittyy hologrammin valmistustekniikkaan. Suuret hologrammit on valmistettava useana kappaleena ja liitettävä myöhemmin yhteen, koska tarpeeksi suuria laitteita hologrammikuviointin etsaukseen ei ole löydetty. Myös saatavilla olevat materiaalit asettavat rajoituksia. Esimerkiksi ADMIRALS RTO-testiantennin mittauksissa taajuudella 322 GHz käytetty halkaisijaltaan kolmen metrin hologrammi koottiin kolmesta palasta juottamalla palat metallikuviointin puolelta yhteen [1].

3 Heijastinantennit

Antenni on muunnin ohjatun ja vapaan tilan välillä. Erilaisia antenniratkaisuita on lukuisia ja sopivin rakenne riippuu käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi matkaradiossa käytetään usein yksinkertaista ympärisäteilevää lanka-antennia, televisiolähetysten vastaanotossa taas suosittuja antenneja ovat suuntaavat ja laajakaistaiset log-periodiset ja Yagi-antennit. Matkapuhelimen antennin on oltava pieni ja ympärisäteilevä, jolloin hyviä ratkaisuja ovat mikroliuska- ja PIFA-antennit. Satelliittitietoliikenteessä käytetään suuria taajuuksia laajakaistaisen yhteyden saamiseksi, kaukokartoituksessa suuria taajuuksia käytetään hyvän paikkaresoluution saavuttamiseksi sekä ilmakehän ilmiöiden takia, radioastronomiassa suuri tieteellinen mielenkiinto kohdistuu alimillimetriaaltoalueen ilmiöihin. Näihin tarkoituksiin sopivat hyvin erilaiset heijastinantennit, jotka ovatkin yleisimpiä millimetri- ja alimillimetriaaltoalueen antenneja. Tässä luvussa käsitellään antennien perusteoriaa, sekä esitellään yleisimpiä heijastinantennityyppejä.

3.1 Antenniteoriaa

3.1.1 Virtajakauman säteily

Antennin voidaan ajatella muodostuvan tietyssä tilavuudessa olevasta virtajakaumasta. Antennin säteily tietyssä pisteessä voidaan laskea integroimalla virtajakauman aiheuttama kenttä. Virtajakauman $\vec{J}(\vec{r})$ aiheuttaman säteilyn laskemiseksi lasketaan ensin vektoripotentiaali integraalina virta-alueen ylitse [9]:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \mu \int_V \frac{\vec{J}(\vec{r}') e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} dV', \quad (3.1)$$

jossa μ on väliaineen permeabiliteetti, k on aaltoluku, \vec{r} on kenttäpisteen paikkavektori, \vec{r}' on integrointimuuttuja ja V on virta-alue. Tämän jälkeen vektoripotentiaalista voidaan laskea magneettikenttä halutussa pisteessä:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{\nabla \times \vec{A}(\vec{r})}{\mu}. \quad (3.2)$$

Sähkökenttä lasketaan magneettikentästä:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\nabla \times \vec{H}(\vec{r})}{j\omega\epsilon}, \quad (3.3)$$

jossa $\omega = 2\pi f$ on kulmataajuus ja ϵ on väliaineen permittiivisyys. Tässä sähkökenttä on määritelty vain virta-alueen ulkopuolella. Jos halutaan laskea sähkömagneettisen kentän aiheuttama säteily, on ensin laskettava ekvivalenttiset sähköiset ja magneettiset pintavirrat [10].

3.1.2 Lähikenttä-kaukokenttä-muunnos

Yhtälöillä (3.1)-(3.3) voidaan laskea mielivaltaisen virtajakauman aiheuttama kenttä mielivaltaisessa paikassa virtajakauman ulkopuolella. Antenneja tarkasteltaessa ollaan usein kiinnostuneita vain antennista hyvin kaukana olevista kentistä. Tällöin edellinen muunnos sievenee Fourier-muunnokseksi. Fourier-muuntamalla antennin apertuurin kenttä saadaan selville suuntaspektri. Suuntaspektri ilmaisee minkälaisia tasoaaltokomponentteja summaamalla on mahdollista muodostaa apertuurissa oleva kenttä. Kaukana antennista oleva kenttä eli antennin säteilykuvio on juuri suuntaspektri.

3.1.3 Antennien peruskäsitteitä

Antennin säteilykuvio ilmaisee kulman funktiona antennin säteilemän kentän ominaisuutta, kuten tehotiheyttä, vaihetta tai polarisaatiota eri suunnissa kaukana antennista. Resiprookkisuuden perusteella säteilykuvio kuvaa myös antennin ominaisuuksia vastaanotossa. Suuntakuviokuva antennin säteilemää tehotiheyttä eri suuntiin. Tavallisesti käytetään normalisoitua suuntakuviota, jolloin suuntakuvion suurin arvo on 1 (0 dB). Suuntaavuus D ilmaisee maksimitehotiheyden suhteen keskimääräiseen tehotiheyteen:

$$D = \frac{4\pi}{\int \int_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega}, \quad (3.4)$$

jossa $P_n(\theta, \phi)$ on normalisoitu suuntakuviokuva ja $d\Omega$ on avaruuskulman alkio. Antennin vahvistus G on antennin säteilemän suurimman tehotiheyden suhde siihen tehotiheyteen, joka saataisiin, jos häviötön isotrooppinen antenni säteilisi antennin sisäänmenoon tulevan tehon. Vahvistus saadaan kaavasta

$$G = \eta_r D, \quad (3.5)$$

jossa η_r on säteilyhyötysuhde.

Antennin efektiivinen pinta-ala A_{ef} on se pinta-ala, jolta antennin voidaan ajatella vastaanottavan kaiken tehon. Efektiivinen pinta-ala voidaan laskea vahvistuksesta:

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G, \quad (3.6)$$

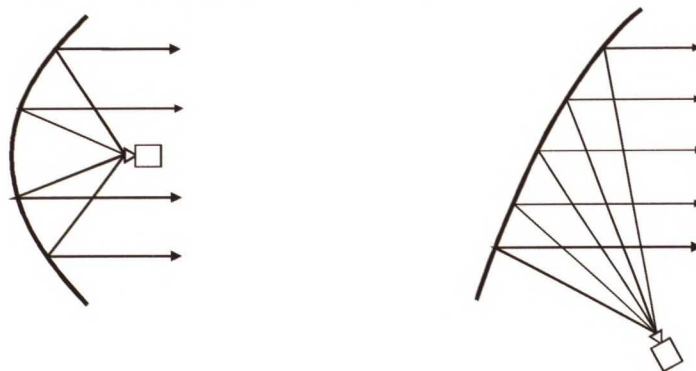
jossa λ on aallonpituus. Antennin apertuurihyötysuhde on antennin efektiivisen pinta-alan suhde sen apertuurin pinta-alaan.

Antennin polarisaatiosta riippuu, millä tavalla polarisoitunutta aaltoa se lähettää ja vastaanottaa. Pääpolarisaatioksi kutsutaan polarisaatiota, jolla antennin on tarkoitettu toimivan. Tälle polarisaatiolle ortogonaalista polarisaatiota kutsutaan ristipolarisaatioksi [11]. Ristipolarisaatiosoksi kutsutaan antennin lähettämän ristipolarisaatiolla olevan tehon suhdetta pääpolarisaatiolla olevaan tehoon. Ristipolarisaation määrä riippuu suunnasta ja on tavallisesti pienimmillään pääkeilan suunnassa.

3.2 Heijastinantennirakenteita

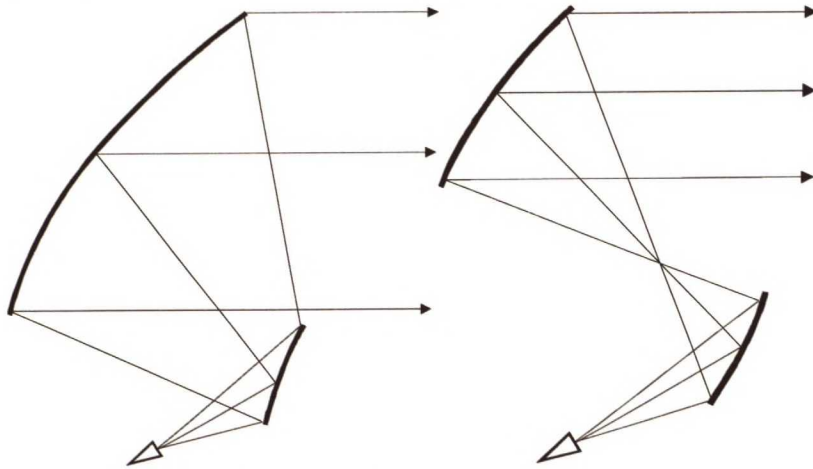
Heijastinantennirakenteet voidaan jakaa klassisiin ja muotoiltuihin. Klassisissa rakenteissa erilaiset kartioleikkaukset määrittelevät peilien pinnat. Muotoilluissa rakenteissa peilien pinnat voivat olla mielivaltaisen muotoisia. Klassisten antennien rakenne on muotoiltuja rakenteita yksinkertaisempi ja niiden suunnittelu on helpompaa. Muotoiltujen heijastinantennien etuna on se, että säteilykuvio on suunniteltavissa halutunlaiseksi.

Paraboloidiantenni on klassinen yksiheijastiminen antenni. Paraboloidiantenni voi olla joko edestä syötetty tai sivusta syötetty. Edestä syötetyssä antennirakenteessa syöttö ja syötön tukirakenteet peittävät antennin apertuuria, jolloin vahvistus jää pienemmäksi ja sivukeilataso suuremmaksi kuin sivusta syötetyssä antennissa. Sivusta syötetyn paraboloidin ristipolarisaatiosuhteus on puolestaan suurempi. Kuvassa 3-1 on esitetty edestä ja sivusta syötetyn paraboloidiantennin rakenne.



Kuva 3-1. Edestä ja sivusta syötetty paraboloidiantenni [12].

Heijastinantennin sähköisiä ominaisuuksia voidaan parantaa käyttämällä apuheijastinta. Apuheijastin on joko pääheijastimen apertuurin edessä tai sivussa. Sivusta syötetty antenni on sähköisiltä ominaisuuksiltaan parempi lukuun ottamatta korkeaa ristipolarisaatiotasoa. Tosin myös sivusta syötetyn antennin ristipolarisaatiotaso saadaan pieneksi oikealla suunnittelulla. Kuvassa 3-2 on esitetty sivusta syötettyjen Cassegrain- ja Gregorian-antennien rakenteet.



Kuva 3-2. Sivusta syötetyt Cassegrain- ja Gregorian-antennit [12].

4 Hiljaisen alueen häiriöiden tunnistaminen

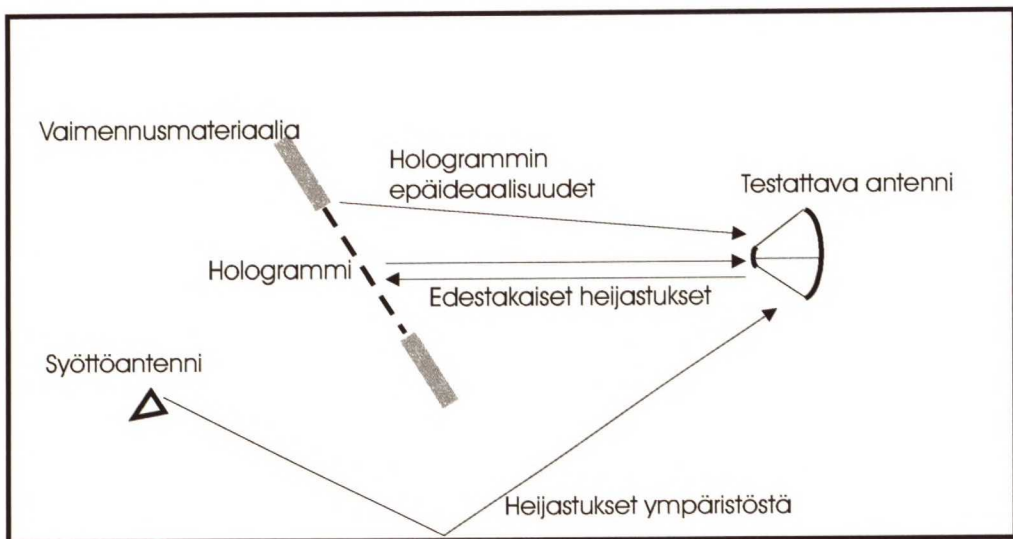
Millimetri- ja alimillimetriaaltoalueella suuren ja hyvän kompaktin antennimittauspaikan rakentaminen on erittäin haastavaa. Tässä luvussa esitellään menetelmiä mittaustaikan häiriöiden tunnistamiseksi. Osaa esitellyistä menetelmistä voidaan käyttää myös häiriöiden vaikutuksen pienentämiseen mittaustuloksissa.

4.1 Häiriölähteet ja niiden vaikutus antennin suuntakuviin mittauksissa

Kompaktissa antennimittauspaikassa on aina häiriöitä, joiden vuoksi mittaustaikan tasoaalto ja siten myös antennin mittaustulos on vääristynyt. Kompakteissa antennimittauspaikoissa voi olla seuraavanlaisia häiriöitä [13]:

1. Heijastuksista ja sironnasta johtuvat häiriöt
2. Syöttöantennijärjestelmän vuotosäteily hiljaiselle alueelle, esimerkiksi syöttöantennin suora säteily kollimoivan elementin ohi
3. Edestakaisista heijastuksista johtuvat häiriöt, erityisesti tutkittavan antennin ja kollimoivan elementin välisistä heijastuksista johtuvat häiriöt

Lisäksi kompaktissa antennimittauspaikassa häiriötä aiheutuu fokusoivan elementin epäideaalisuuksista. Kuvassa 4-1 on esitetty joitakin hologrammiin perustuvassa kompaktissa mittaustaikassa olevia häiriöitä.



Kuva 4-1. Häiriöt hologrammiin perustuvassa kompaktissa antennimittauspaikassa.

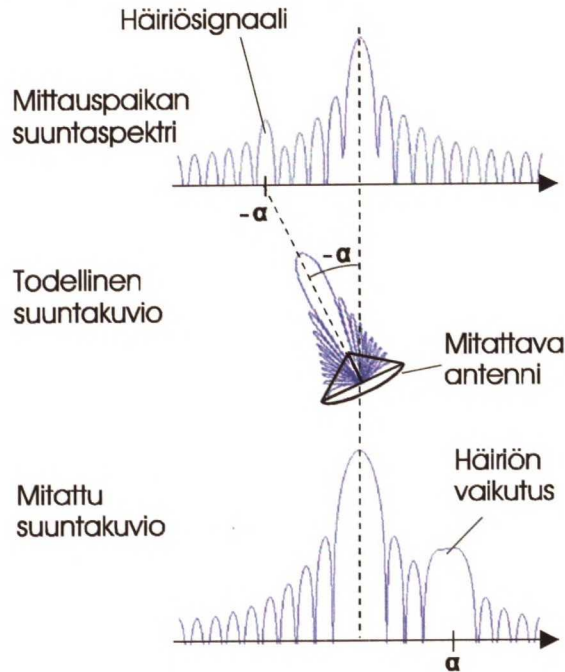
Jos antenni, jonka suuntakuvio on $A(\theta)$, mitataan epäideaalisessa antennimittauspaikassa, jonka hiljaisen alueen kentän suuntaspektri on $S(\theta)$, on mitattu suuntakuvio

$$F(\theta) = A(\theta) \otimes S(\theta), \quad (4.1)$$

jossa \otimes tarkoittaa konvoluutiota. Konvoluutio suunta-avaruudessa tarkoittaa kertolaskua paikka-avaruudessa, joten edellinen voidaan esittää myös muodossa

$$F(\theta) = \mathcal{F}\{\vec{E}_{ant} \vec{E}_{qz}\}, \quad (4.2)$$

jossa $\mathcal{F}\{\}$ tarkoittaa Fourier-muunnosta, \vec{E}_{ant} on antennin apertuurin kenttä ja \vec{E}_{qz} on mittauspaikan hiljaisen alueen kenttä antennin apertuurissa. Mitattaessa suuntaavia antennia, joilla on matalat sivukeilat, vaikuttaa pääkeilan suunnasta tuleva pienikin häiriösignaali voimakkaasti suuntakuvioon. Kuvassa 4-2 on esitetty häiriösignaalin vaikutus antennin suuntakuvion mittauksessa. Antennimittauspaikkaan tulee häiriö suunnasta $-\alpha$. Mitattaessa antennin suuntakuvion kulman arvolla α (tällöin antennin kiertokulma on $-\alpha$), vahvistaa antennin pääkeila häiriösignaalia, jolloin vastaanotetaan voimakas signaali. Vaikka antennin todellisessa suuntakuviossa olisi nolla kulman arvolla α , on mitatussa suuntakuviossa häiriön aiheuttama sivukeila.



Kuva 4-2. Häiriöiden vaikutus suuntakuvion mittauksessa.

Satelliittiantennien suuntakuvioissa usein kiinnostavin alue on pääkeilan ympäristö. Tällöin pienistä kulmista tulevat häiriösignaalit ovat kriittisimpiä. Tällaisia häiriöitä

aiheutuu hologrammin epäideaalisuuksista, edestakaisista heijastuksista hologrammin ja mitattavan antennin välillä, sekä hologrammille tulevista häiriösignaaleista, jotka ohjautuvat hiljaiselle alueelle.

4.2 Tasoaaltokehitykset

Tasoaaltokehityksissä hiljaisen alueen riittävällä tarkkuudella näytteistetyistä kentästä lasketaan hiljaiselle alueelle tulevien tasoaaltojen suunnat, amplitudit ja vaiheet.

Nyquistin näytteenottoteoreeman mukaan näytteitä on otettava vähintään $\frac{\lambda}{2 \sin(\theta_{\max})}$

välein, jossa θ_{\max} on suurin kulma, josta tulevat aallot halutaan erottaa. Tätä suuremmista kulmista tulevat aallot laskostuvat pienemmille kulman arvoille. Suuntaspektri voidaan laskea Fourier-muunnoksen avulla, tai erityisesti laskentaan kehitetyillä algoritmeilla, kuten esimerkiksi MUSIC-algoritmeilla.

4.2.1 Fourier-muunnos

Jos hiljaisen alueen kenttä on näytteistetty suoraan etenevän tasoaallon etenemissuuntaa vastaan kohtisuorassa xy -tasossa, voidaan se esittää summana erilaisia tasoaaltoja [14]:

$$E_{qz}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(k_x, k_y) e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}} dk_x dk_y, \quad (4.3)$$

jossa aaltovektori $\vec{k} = k_x \vec{u}_x + k_y \vec{u}_y + k_z \vec{u}_z$ ja \vec{r} on paikkavektori. Termiä $A(k_x, k_y)$ kutsutaan tasoaaltospektriä (tai suuntaspektriä), koska termi $A(k_x, k_y) e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}}$ integraalissa esittää suuntaan \vec{k} etenevää tasoaaltoa. Suuntaspektri voidaan ratkaista edellisestä:

$$A(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{qz}(x, y) e^{j\vec{k} \cdot \vec{r}} dk_x dk_y. \quad (4.4)$$

Aaltolukuresoluutio on $k_{\text{res}} = \frac{2\pi}{Nd}$, jossa N on näytteiden lukumäärä ja d on näytepisteiden väli [15]. Fourier-muunnoksessa näytteenottoantennin säteilykuvion vaikutus laskettuun suuntaspektriin voidaan poistaa jakamalla suuntaspektri näytteenottoantennin säteilykuviolla.

4.2.2 MUSIC-algoritmi

MUSIC-algoritmi (Multiple Signal Classification) on signaalien tulosuuntien, voimakkuuksien ja vaiheiden arvioimiseen soveltuva menetelmä [16]. Oletetaan, että hiljaisen alueen kenttä on näytteistetty M pisteessä. Jokaisessa pisteessä oleva kenttä on lineaarinen yhdistelmä D suunnasta tulevasta tasoaallosta sekä kohinasta (oletetaan, että kaikki tasoaaltojen lähteet ovat mittausalueen kaukokentässä). Vastaanotettu signaali voidaan esittää muodossa

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(\theta_1) & a(\theta_2) & \dots & a(\theta_D) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_M \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

tai

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{F} + \mathbf{W}. \quad (4.6)$$

Vektorin \mathbf{F} alkiot esittävät tulevien signaalien amplitudia ja vaihetta jonkin tietyn paikan, esimerkiksi origon suhteen ja vektorin \mathbf{W} alkiot esittävät kohinaa tietyssä mittauspisteessä. Matriisin \mathbf{A} alkiot riippuvat tulevien signaalien suunnista, näytteenottoantennin säteilykuvioista, sekä mittauspisteiden paikasta. Jos oletetaan, että eri signaalit ja kohina ovat korreloimattomia, voidaan vektorin \mathbf{X} kovarianssimatriisi kirjoittaa

$$\mathbf{S} = \overline{\mathbf{X}\mathbf{X}^T} = \mathbf{A}\overline{\mathbf{F}\mathbf{F}^T}\mathbf{A}^T + \overline{\mathbf{W}\mathbf{W}^T} \quad (4.7)$$

tai

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^T + \lambda_{\min}\mathbf{S}_0, \quad (4.8)$$

jossa λ_{\min} on yhtälön $|\mathbf{S} - \lambda\mathbf{S}_0| = 0$ pienin nollaa suurempi ratkaisu. Edellisen yhtälön suurimmat ominaisarvot liittyvät signaaleihin ja loput pienimmät (keskenään yhtä suuret) liittyvät kohinaan. Tällöin suurimpia ominaisarvoja vastaavat ominaisvektorit virittävät signaaliavaruuden ja loput ominaisvektorit virittävät kohina-avaruuden. Jos \mathbf{E}_N on matriisi, jonka sarakkeet ovat kohinaan liittyvät ominaisvektorit, voidaan signaalin tehotiheysspektriä arvioida laskemalla vektorin $\mathbf{a}(\theta)$ ja kohina-avaruuden \mathbf{E}_N euklidisen etäisyyden käänteisluku eri θ arvoilla:

$$\mathbf{P}_{MU}(\theta) = \frac{1}{\bar{\mathbf{a}}^T(\theta)\mathbf{E}_N\bar{\mathbf{E}}_N^T\mathbf{a}(\theta)}. \quad (4.9)$$

Tehotiheysspektrin maksimeista saadaan selville signaalien tulosuunnat, jonka jälkeen voidaan laskea matriisi \mathbf{A} . Tämän jälkeen saadaan

$$\mathbf{P} = \bar{\mathbf{F}}\mathbf{F}^T = (\bar{\mathbf{A}}^T\mathbf{A})^{-1}\bar{\mathbf{A}}^T(\mathbf{S} - \lambda_{\min}\mathbf{S}_0)\mathbf{A}(\bar{\mathbf{A}}^T\mathbf{A})^{-1}, \quad (4.10)$$

josta voidaan ratkaista tulevien signaalien parametrit.

Edellä oletettiin, että eri signaalit ja kohina ovat korreloimattomia. Näin ei kuitenkaan käytännössä ole, sillä signaalit ovat peräisin samasta koherentista lähteestä. Griffiths on esittänyt menetelmän, jolla ongelma voidaan välttää [14].

4.2.3 Ikkunointi

Sekä MUSIC-algoritmissa että Fourier-muunnoksessa oletetaan, että alue, jossa kenttä on näytteistetty on häiriölähteiden kaukokentässä. Jos koko mittausalue ei täytä kaukokenttäehtoa, voidaan mittausdataa ikkunoida pienempiin osiin ja laskea suuntaspektri kaikille osille erikseen. Tämä tehdään aaltolukuresoluution kustannuksella. Jos tutkitaan paljon näytealuetta pidempijaksoisia signaaleja, kannattaa ikkunafunktio taperoida reunoilta [15].

4.2.4 Pääkeilan suodatus

Suuntaspektrin suuret komponentit saattavat peittää alleen pienempiä häiriökomponentteja. Pienten häiriösignaalien esille saamiseksi suuret komponentit voidaan suodattaa suuntaspektristä. Esimerkiksi viitteessä [17] on suodatettu nopealla Fourier-muunnoksella (FFT, Fast Fourier Transform) lasketusta spektristä suuret signaalit Kaiser-Bessel ikkunalla. Tämän jälkeen nopealla käänteisellä Fourier-muunnoksella (IFFT, Inverse FFT) käänteismuunnetusta datasta on etsitty häiriösignaalien suunnat MUSIC-algoritmillä.

4.2.5 TCD-menetelmä

TCD-menetelmässä (Translation Corrected Data) tutkittava kenttä näytteistetään kahdessa tasossa, jotka ovat tasoaaltoa vastaan kohtisuoria [17]. Tasojen välinen etäisyys on aallonpituuden puolikas. Näytteistetyt kentät summataan pisteittäin, jolloin saadaan TCD-data. Koska suoraan tulevan tasoaallon vaihe-ero näytteenottotasojen välillä on 180° , kumoutuu kyseinen komponentti summauksessa. Tosin summauksessa kumoutuu samalla muistakin suunnista, kuten suunnista $\pm 70,5^\circ$ ja $\pm 78,5^\circ$ tulevia

tasoaaltokomponentteja. TCD-datasta voidaan selvittää häiriökomponentit laskemalla sen suuntaspektri.

4.3 Käänteinen konvoluutio

Käänteisellä konvoluutiolla voidaan poistaa häiriöiden vaikutus mitatusta suuntakuviosta, jos tunnetaan mittauspaikan suuntaspektri [18]. Mittauspaikan suuntaspektri selvitetään mittaamalla jonkun tunnetun antennin säteilykuvio hiljaisessa alueessa.

Jos vertailuantenni, jonka todellinen säteilykuvio on $P(\theta)$, mitataan mittauspaikassa, jonka suuntaspektri on $S(\theta)$, on mitattu suuntakuvio

$$D(\theta) = P(\theta) \otimes S(\theta), \quad (4.11)$$

jossa \otimes tarkoittaa konvoluutiota. Edellisestä voidaan ratkaista mittauspaikan suuntaspektri. Jos mittauspaikassa mitataan antennia, jonka todellinen säteilykuvio on $A(\theta)$, saadaan mitatuksi säteilykuvioksi

$$F(\theta) = A(\theta) \otimes S(\theta). \quad (4.12)$$

Tästä voidaan ratkaista mitattavan antennin todellinen säteilykuvio $A(\theta)$ käänteisen konvoluution avulla. Mittauspaikan suuntaspektri voidaan laskea myös näytteistetyistä hiljaisesta alueesta.

Jos mittauspaikan suuntaspektri selvitetään vertailuantennin avulla, on löydettävä suunnilleen testattavan antennin kokoinen vertailuantenni, joka toimii samalla taajuudella testattavan antennin kanssa ja jonka säteilykuvio tunnetaan erittäin tarkasti. Tällaisia alimillimetriaaltoalueen referenssiantenneja ei ole saatavilla. Jos suuntaspektri selvitetään näytteistetyistä hiljaisesta alueesta, on hiljainen alue näytteistettävä samalla tarkkuudella kuin antennin lähikenttä lähikenttämittauksessa. Tässä on siis samat ongelmat kuin lähikenttämittauksessa. Laskettiinpa mittauspaikan suuntaspektri miten tahansa, on mitattavan antennin vaihekeskipiste saatava juuri samaan tasoon, jossa suuntaspektri on laskettu. Tämä on erittäin haastavaa tai jopa mahdotonta millimetri- ja alimillimetriaaltoalueella.

Jos antennimittauspaikka rakennetaan yhden antennin mittaamista varten, ei käänteisestä konvoluutiosta ole merkittävää hyötyä. Koska antennin lähikentän mittaaminen on yhtä työlästä kuin hiljaisen alueen mittaaminen, voitaisiin suoraan mitata antennin lähikenttä. Jos taas voidaan olettaa, että antennimittauspaikan

suuntaspektri pysyy samana useiden mittausten ajan, voidaan antenneja mitata nopeasti kompaktissa antennimittauspaikassa ja korjata mittaustuloksia kerran mitatulla suuntaspektrillä.

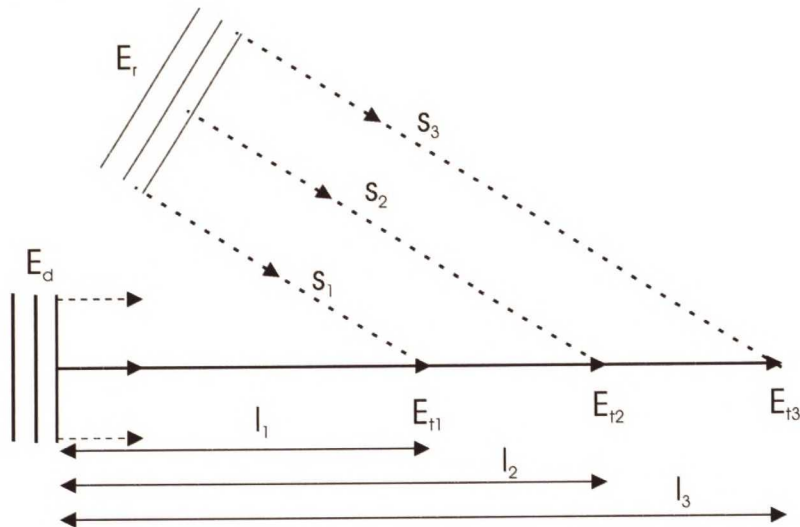
4.4 Fresnelin alueen muunnos

Fresnelin alueen muunnoksessa tutkittava antenni mitataan mittausantennin lähikentässä pallomaisessa aaltorintamassa [19]. Kun tiedetään mittausantennin etäisyys tutkittavasta antennista, voidaan laskea mittauspaikan suuntaspektri. Tämän jälkeen pallomaisen aaltorintaman vaikutus poistetaan samaan tapaan kuin käänteisessä konvoluutiassa.

4.5 NAPC-menetelmä

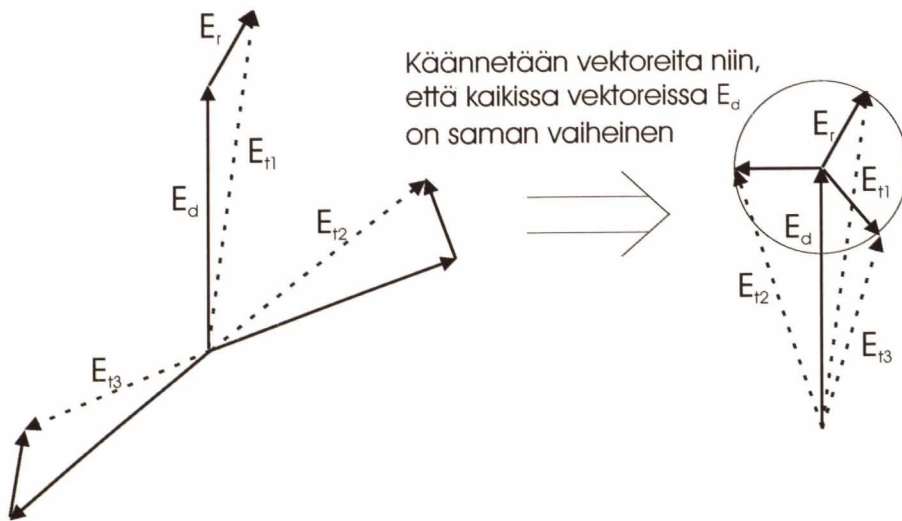
APC-menetelmässä (Antenna Pattern Comparison) antennin suuntakuvio mitataan useassa, lähellä toisiaan olevassa kohdassa mittauspaikkaa. Vertaamalla mitattuja suuntakuvioita, voidaan määrittää mittauspaikan häiriösignaalien taso [20]. NAPC-menetelmä (Novel Antenna Pattern Comparison tai AAPC, Advanced Antenna Pattern Comparison) on kehitetty APC-menetelmästä. NAPC-menetelmällä voidaan selvittää ulkopuolisten häiriölähteiden suunta, sekä poistaa häiriölähteiden ja mitattavan antennin ja mittauspaikan välisten moninkertaisten heijastusten vaikutus mittaustuloksista [13].

Ajatellaan kuvan 4-3 mukaista tilannetta, jossa mitattava kenttä muodostuu tasoaallosta \vec{E}_d ja häiriösignaalista \vec{E}_r .



Kuva 4-3. Tasoaallon E_d ja häiriösignaalin E_r erilainen vaiheenmuutos pisteiden E_{t1} , E_{t2} ja E_{t3} välillä.

Kuvassa 4-4 on esitetty kohdissa 1-3 olevia kenttiä vastaavat kenttävektorit \vec{E}_{t1} , \vec{E}_{t2} ja \vec{E}_{t3} . Jos tiedetään pisteiden välinen etäisyys, voidaan laskea tasoaaltokomponenttiin tuleva vaihe-ero. Tämän jälkeen vektorit voidaan kääntää niin, että kaikissa tasoaaltokomponentti on samanvaiheinen. Jos nyt piirretään vektoreiden virittämä ympyrä (kuva 4-4), saadaan selville tasoaaltokomponentti, sekä häiriökomponentin amplitudi ja vaihe jokaisessa pisteessä. Häiriökomponenttien vaihe-erosta voidaan tämän jälkeen määrittää häiriön tulosuunta. Pienillä antennin kiertokulmilla mitattavan antennin ja mittauspaidan kollimoivan elementin, kuten heijastimen väliset moninkertaiset heijastukset ovat suurin häiriölähde. Menetelmällä voidaan poistaa myös moninkertaisten heijastusten vaikutus, koska heijastuksista syntyvällä seisovalla aallolla on eri aallonpituus kuin etenevällä tasoaallolla.



Kuva 4-4. Tasoaaltokomponenttien E_d asettaminen saman vaiheisiksi NAPC-menetelmässä.

NAPC-menetelmässä on siis mitattava antennin säteilykuvio (amplitudi ja vaihe) vähintään kolmessa lähellä toisiaan olevassa kohdassa mittauspaitkaa. Tämän jälkeen voidaan laskea häiriökomponentin taso ja suunta jokaisella mitatulla kulman arvolla. Suuntaavaa antennia mitattaessa ei haittaa, vaikka menetelmällä saadaan selville vain yksi häiriökomponentti yhdellä kulman arvolla, koska suuntaava antenni suodattaa tehokkaasti pääkeilan ulkopuolelta tulevat häiriöt.

Menetelmän tarkkuuteen vaikuttaa merkittävästi se, miten mitatut ja saman vaiheisiksi asetetut vektorit asettuvat ympyrän kehälle. Jos vektorit asettuvat liian lähelle toisiaan, on ympyrän määrittäminen epätarkkaa. Norel on esittänyt menetelmän optimaalisen mittauspaidan siirron määrittämiseksi [21]. Mittauspaikan siirron suuruuteen vaikuttaa aallonpituus, mittauspisteiden määrä, sekä se, mistä suunnasta halutaan mitata tarkasti.

Siirron suuntaan vaikuttaa se, halutaanko mittaustuloksista poistaa mitattavan antennin ja testiantennin välisten heijastusten vaikutus vai ulkopuolisten häiriöiden vaikutus. Jos mittausta paikkaa siirretään mittausta paikan tasoaallon suuntaisesti, voidaan erottaa antennien väliset moninkertaiset heijastukset. Jos taas halutaan erottaa tarkasti pienistä kulmista tulevat ulkopuoliset häiriöt, on mittausta paikkaa siirrettävä tasoaallon kulkusuuntaan nähden sivuttain.

Viitteessä [22] käsitellään NAPC-menetelmän tarkkuuteen vaikuttavaa ympyränsovitus algoritmia sekä sitä, milloin mitatut vektorit ovat tarpeeksi kaukana toisistaan mittaustuloksen korjaamiseksi.

NAPC-menetelmä voisi olla hyvä virheenkorjausmenetelmä millimetri- ja alimillimetriaaltoalueella toimivia satelliittiantenneja mitattaessa. Menetelmää on helppo soveltaa; antennin säteilykuvio (amplitudi ja vaihe) on mitattava useaan kertaan eri kohdissa mittausta paikkaa. Mittauskohtien välisellä etäisyydellä ei ole suurta merkitystä, mutta etäisyys on voitava määrittää tarkasti, esimerkiksi laserin avulla mittaamalla. Tällöin ei tarvita tarkkaa antennipyörittimen siirrintä. Menetelmän etuna on myös se, että sillä voidaan poistaa pienistä kulmista tulevien häiriöiden vaikutus, toisin kuin useimmilla muilla menetelmillä.

4.6 Virtuaaliseen antenniryhmään perustuva menetelmä

Virtuaaliseen antenniryhmään perustuvassa menetelmässä (Virtual Array) antennin suuntakuviot mitataan kahteen kertaan [23]. Ensimmäisen mittauskerran aikana antenni pidetään paikallaan, ja toisella mittauskerralla antennin paikkaa muutetaan antennin kiertokulman funktiona. Korjattu antennin suuntakuviot saadaan, kun mitatut suuntakuviot lasketaan yhteen niin, että molemmissa suuntakuvioissa mittausta paikan tasoaaltokomponentit ovat samanvaiheisia ja antennin pääkeilan suunnasta tulevat komponentit vastakkaisvaiheisia. Näin mittaustuloksista saadaan poistettua jokaisessa mittauspisteessä antennin pääkeilan suunnasta tuleva, yleensä eniten vaikuttava häiriö.

Virtuaaliseen antenniryhmään perustuvassa menetelmässä antennin korjattu suuntakuviot lasketaan kaavasta

$$F_c(\theta) = \frac{1}{2} [F(\theta) + \tilde{F}(\theta)], \quad (4.13)$$

jossa $F(\theta)$ on paikallaan mitattu suuntakuviot ja $\tilde{F}(\theta)$ on mitattu kulman arvolla θ etäisyydellä $d = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta)}$ ensimmäisestä mittausta paikasta. Tässä etäisyys d on

tasoaallon etenemissuuntaa vastaan poikittainen etäisyys θ -tasossa. Toinen suuntakuvio voidaan mitata myös liikuttamalla antennia tasoaallon suuntaisesti.

Tämän menetelmän huono puoli on se, että sillä on vaikea korjata läheltä mittausta paikan tasoaaltoa tulevia häiriöitä, jotka usein ovat kriittisimpiä satelliittiantenneja mitattaessa. Lisäksi suurilla taajuuksilla mitattavan antennin tarpeeksi tarkka liikuttelu on haastavaa.

4.7 Palloaaltokehitelmiin perustuvat menetelmät

Viitteissä [24, 25 ja 26] on esitetty palloaaltokehitelmiin perustuvia virheenkorjausmenetelmiä. Menetelmissä mitataan mittausta paikan kenttä pallopinnalla, joka peittää mitattavan antennin. Mittausta paikan kentästä muodostetaan palloaaltokehitelmiä, jonka avulla mitattavan antennin suuntakuvio korjataan iteratiivisella menetelmällä. Mittaustarkkuuden ja mittauspisteiden välin on oltava samaa luokkaa kuin lähikenttämittauksissa.

Palloaaltokehitelmiin perustuva virheenkorjausmenetelmä ei sovellu suurella taajuudella toimivan suuren satelliittiantennin mittauksiin. Jos mittausta paikan kenttä näytteistetään esimerkiksi 0,5 mm:n välein antennin peittävältä pallopinnalta, jonka halkaisija on metrejä, on mittausaika aivan liian pitkä. Lisäksi tarpeeksi suuren ja tarkan näytteenottoantennin siirtimen rakentaminen olisi erittäin hankalaa.

4.8 Mittaukset aika- tai taajuusalueessa

Viitteessä [27] on esitetty antennin suuntakuvion korjaamiseksi kehitetty ajan portitusmenetelmä (Time Gating). Menetelmässä tutkittavaa antennia valaistetaan lyhyellä (tavallisesti 1-3 ns) pulssilla. Pidemmän kulkumatkan vuoksi mittausta paikasta heijastuneet häiriösignaalit saapuvat mitattavalle antennille suoraan edennyttä signaalia myöhemmin. Mitattaessa tutkittavan antennin taajuusvastetta, voidaan antennille suoraan edennyttä pulssia myöhemmin saapuvat heijastukset erotella nopealla kytkimellä.

Koska aika- ja taajuusalue sisältävät saman tiedon, voidaan mittaus suorittaa myös taajuusalueessa. Tällöin tutkittavan antennin vaste (amplitudi ja vaihe) $T(f, \theta)$ mitataan useilla Δf välein olevilla taajuuksilla välillä $[f_L, f_H]$ eri kulman arvoilla θ . Mitatusta vasteesta voidaan laskea antennin vaste mielivaltaiselle pulssille, jonka spektri on välillä $[f_L, f_H]$. Antennin vaste pulssiin, jonka spektri on $X(f)$ on

$$Y(f, \theta) = X(f)T(f, \theta). \quad (4.14)$$

Taajuusvaste $Y(f, \theta)$ Fourier-muunnetaan aikavasteeksi $y(t, \theta)$, johon voidaan soveltaa ikkunafunktiota $g(t)$ heijastuksista johtuvien häiriöiden eliminoimiseksi. Näin saadaan ikkunoitu aikavaste

$$z(t, \theta) = g(t)y(t, \theta), \quad (4.15)$$

josta saadaan Fourier-muunnoksella antennin korjattu taajuusvaste $Z(f, \theta)$.

Taajuusalueessa mitattaessa etuna on usein parempi signaali-kohina-suhde ja se, että yhden mittauksen tuloksiin voidaan soveltaa eripituisia pulsseja ja erilaisia aikaikkunoita.

Jotta heijastukset voitaisiin erotella, on pulssin pituuden T_{pulssi} oltava lyhyempi, kuin mikä on suoraan edenneen ja heijastuneen signaalin välinen viive. Taajuusalueen mittauksissa pienimmän ja suurimman taajuuden eron on oltava likimain [27]

$$f_H - f_L = \frac{4}{T_{pulssi}}. \quad (4.16)$$

Pulssien toistotaajuuden on oltava likimäärin $1/\Delta f$.

Taajuusalueessa mitattaessa keinotekoisesta aikaikkunasta johtuva ns. reunaefekti (edge effect) rajoittaa taajuusaluetta, jossa mittaus on tarkka. Tarkka taajuusalue on likimäärin [27] $f_H - f_L - 4/T_G$, jossa T_G on aikaikkunan pituus. Tarkka taajuusalue on siis sitä suurempi, mitä lyhyempi aikaikkuna on. Kuitenkin mitä lyhyempi aikaikkuna on, sitä leveämpi on sen spektri ja sitä laajakaistaisempi on antennimittauspaikan ja tutkittavan antennin oltava.

Mittaukset aika-alueessa ovat vaikeita millimetri- ja alimillimetriaaltoalueella tarvittavan suuren näytteenottotaajuuden vuoksi. Mittaukset taajuusalueessa puolestaan vaikuttavat hyvältä ratkaisulta. Korkeilla taajuuksilla edes hologrammin kapeakaistaisuuden (5-10 % [8]) ei pitäisi olla ongelma. Käytettäessä 2 ns pituisia pulssia, on tarvittava kaistanleveys yhtälön (4.16) mukaan likimain 0,4 % keskitaajuudella 500 GHz. Menetelmän ongelmana on se, että vain heijastuksista johtuvat häiriöt saadaan poistettua, kun taas usein kriittisimpiä, hologrammista aiheutuvia häiriöitä ei saada poistettua. Toinen ongelma on se, että hologrammilta lähtevän tasoaallon suunta muuttuu taajuuden muuttuessa.

5 Häiriöiden tunnistaminen ja hiljaisen alueen laadun vaikutus mitattuun suuntakuviin

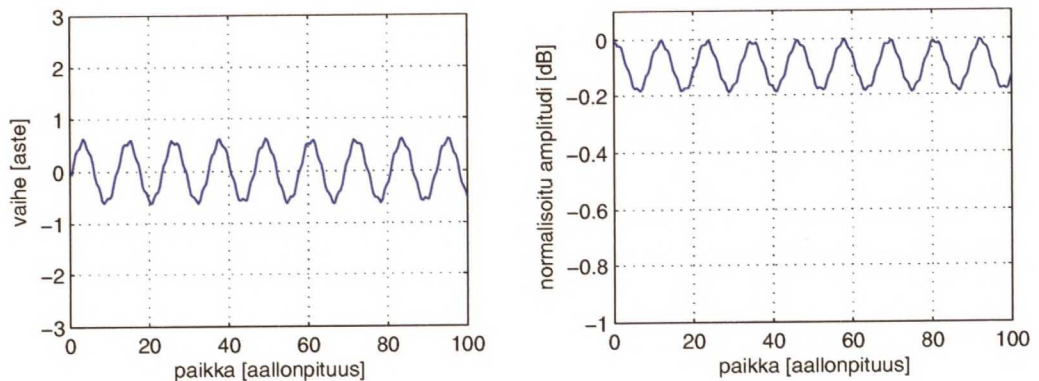
Tässä luvussa tutkitaan numeerisesti pääkeilan suodatusta ja TCD-menetelmää sekä hiljaisen alueen epäideaalisuuksien vaikutusta antennin mitattuun suuntakuviin.

5.1 TCD-menetelmän ja pääkeilan suodatuksen simulointi

TCD-menetelmän ja pääkeilan suodatuksen soveltuvuutta hiljaisen alueen häiriölähteiden tunnistukseen kokeiltiin testitapauksen avulla. Käytetyssä testitapauksessa hiljaisen alueen kenttä koostui seuraavanlaisista tasoaaltokomponenteista:

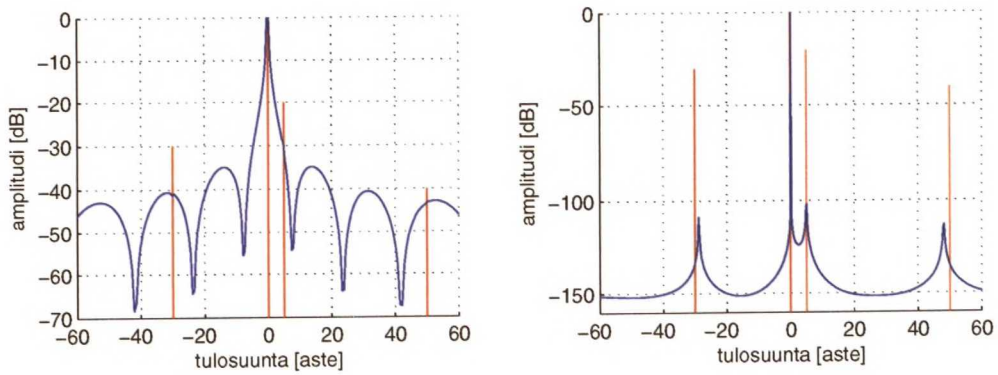
- Tulosuunta 0° ja amplitudi 0 dB
- Tulosuunta 5° ja amplitudi -20 dB
- Tulosuunta -30° ja amplitudi -30 dB
- Tulosuunta 50° ja amplitudi -40 dB

Kohina oli normaalijakautunutta ja sen keskipoikkeama oli -50 dB. Hiljaisessa alueessa oli 225 näytepistettä 0.4833λ :n välein. Kuvassa 5-1 on esitetty hiljaisen alueen vaihe ja amplitudi.



Kuva 5-1. Testitapauksen hiljaisen alueen vaihe ja amplitudi.

TCD-menetelmää varten muodostettujen näytejonojen välinen kohtisuora etäisyys oli $\lambda/4$. Kuvassa 5-2 on esitetty testitapauksen kentän Fourier-muunnoksella ja Matlab'in MUSIC-algoritmillä lasketut hiljaisen alueen suuntaspektrit. Pystyviivat esittävät näytteessä olevia tasoaaltokomponentteja.

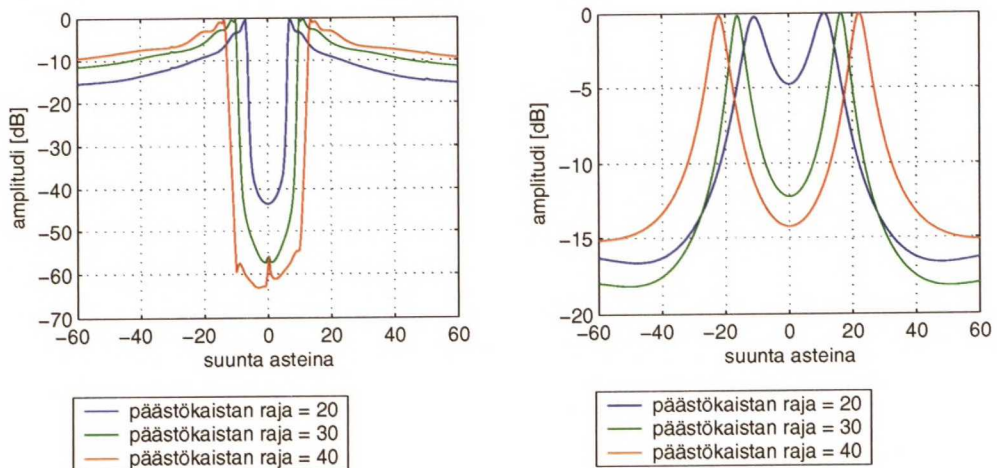


Kuva 5-2. Fourier-muunnoksella ja MUSIC-algoritmilla lasketut suuntaspektrit testitapauksen kentästä.

Fourier-muunnetusta suuntaspektristä voidaan havaita vain kohtisuoraan näytejanaan tuleva tasoaaltokomponentti. MUSIC-suuntaspektrissä voidaan selvästi havaita kaikki tasoaaltokomponentit, joskin -30 dB:n tasoaaltokomponentin lasketussa tulosuunnassa on 1° virhe ja -40 dB:n tasoaaltokomponentin lasketussa tulosuunnassa on 2° virhe. Tämän perusteella MUSIC-algoritmilla huomataan heikompia häiriösignaaleita kuin Fourier-muunnoksella, mutta heikoimpien komponenttien tarkkaa tulosuuntaa ei saada selville.

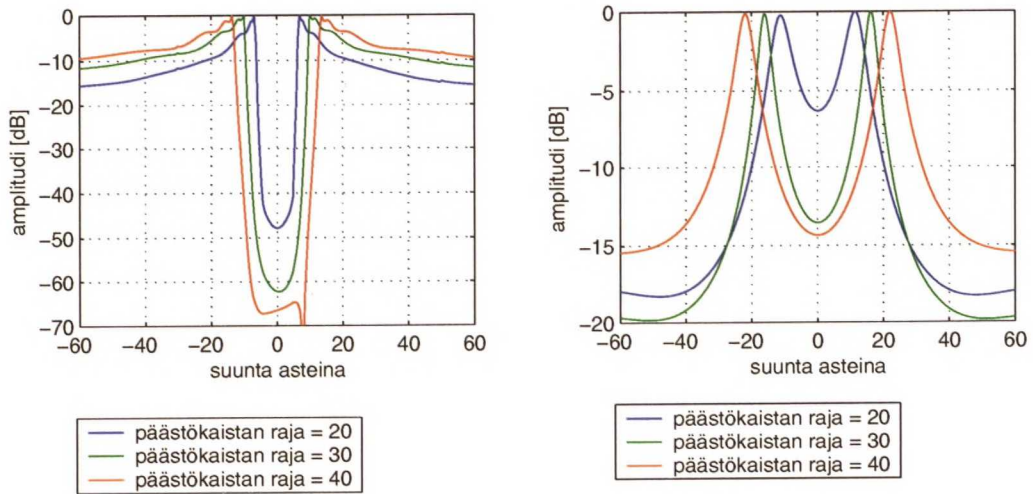
5.1.1 Pääkeilan suodatus

Hiljaisen alueen kentän näytepisteitä suodatettiin kolmella eri elliptisellä ja Tshebyshev I-tyyppisellä digitaalisella ylipäästösuodattimella. Suodattimien asteluku oli 8 ja aaltoilu päästökaistalla 1 dB. Suodattimien päästökaistojen rajat olivat 20° , 30° ja 40° . Elliptisten suodattimien vaimennus estokaistalla oli 100 dB.



Kuva 5-3. Elliptisillä suodattimilla suodatetun näytteen Fourier- ja MUSIC-suuntaspektrit.

Kuvassa 5-3 on esitetty elliptisillä suodattimilla suodatetuista näytteistä lasketut Fourier- ja MUSIC-suuntaspektrit. Pääkeila on suodatettu, mutta spektrin maksimit ovat symmetrisesti pääkeilan molemmilla puolilla. Kuvassa 5-4 on esitetty Fourier- ja MUSIC-suuntaspektrit Tshebyshev-tyyppisillä suodattimilla suodatetuista näytteistä.

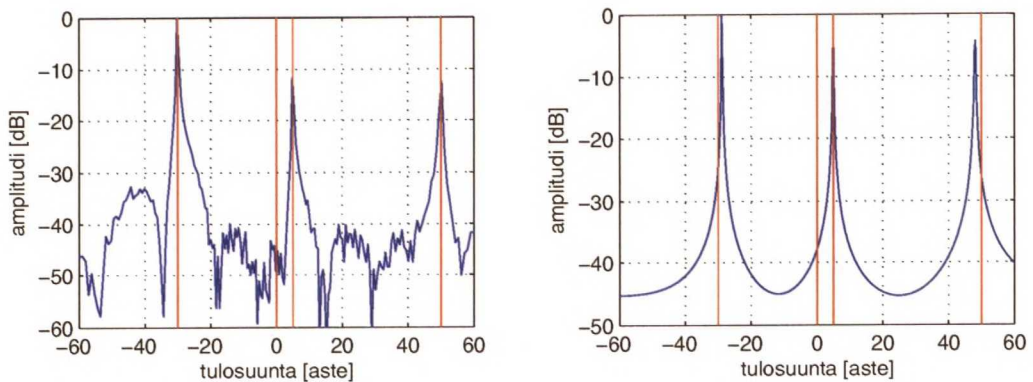


Kuva 5-4. Fourier- ja MUSIC-spektrit Tshebyshev-tyyppisillä suodattimilla suodatetuista näytteistä.

Suodatuksen jälkeen ei ole nähtävissä enää mitään alkuperäisistä tasoaalto-komponenteista. Spektrin maksimit riippuvat vain suodattimen päästökaistan rajasta. Näiden kokeiden perusteella vaikuttaa siltä, että menetelmä ei sovellu häiriölähteiden etsimiseen.

5.1.2 TCD-menetelmä

Kuvassa 5-5 on esitetty TCD-näytteestä lasketut Fourier- ja MUSIC-suuntaspektrit.



Kuva 5-5. TCD-näytteestä lasketut Fourier- ja MUSIC-suuntaspektrit.

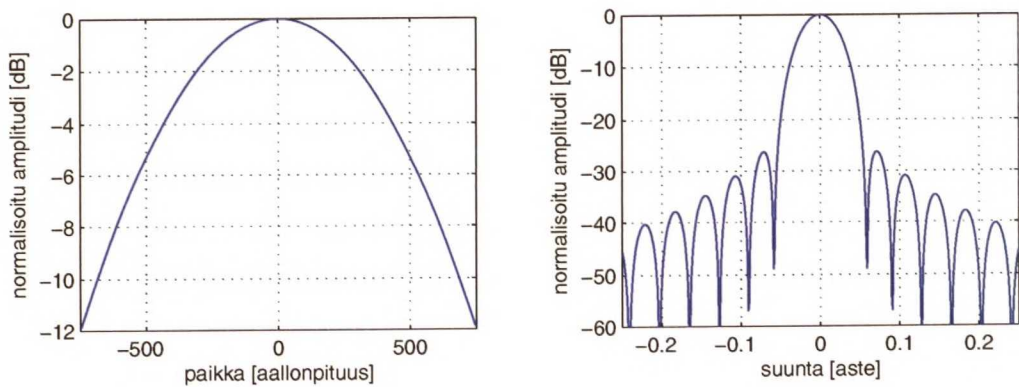
TCD-menetelmällä saatiin pienemmät tasoaaltokomponentit näkyviin myös Fourier-suuntaspektrissä. MUSIC-suuntaspektrin pienimpien tasoaaltokomponenttien suunnassa on muutaman asteen virhe. Fourier-suuntaspektrin piikit ovat sen sijaan hyvin tarkasti oikeissa suunnissa. Häiriöt löytyivät TCD-datasta tarkemmin Fourier-muunnoksella kuin MUSIC-algoritmilli. Tämän kokeen perusteella TCD-menetelmää voitaisiin käyttää kompaktin antennimittauspaikan hiljaisen alueen testauksen yhteydessä mahdollisten häiriölähteiden tunnistamiseksi. Menetelmän etuna on sen helppo toteutus. Korkeilla taajuuksilla ongelmaksi saattaa muodostua näytteenottoantennin tarkka siirtäminen puoli aallonpituutta kohtisuorassa näytetasoa vastaan.

5.2 Hiljaisen alueen epäideaalisuuden vaikutus antennimittauksissa

Tässä kappaleessa tutkitaan numeerisesti minkälaisia virheitä tavallisimmat hologrammiin perustuvan kompaktin antennimittauspaikan hiljaisen alueen epäideaalisuudet aiheuttavat antennin mitattuun suuntakuvioon. Tyypillisiä hiljaisen alueen kentän epäideaalisuuksia ovat esimerkiksi kuoppa amplitudissa tai vaiheessa, kupu amplitudissa tai vaiheessa, porras amplitudissa sekä aaltoilu amplitudissa ja vaiheessa. Lisäksi joskus amplitudissa tai vaiheessa on sekä kupu että kuoppa leikkauksen suunnasta riippuen. Tällöin kyseessä on satulapinta. Epäideaalisuuksien vaikutusta tutkitaan yksi kerrallaan.

5.2.1 Testitapauksen antenni

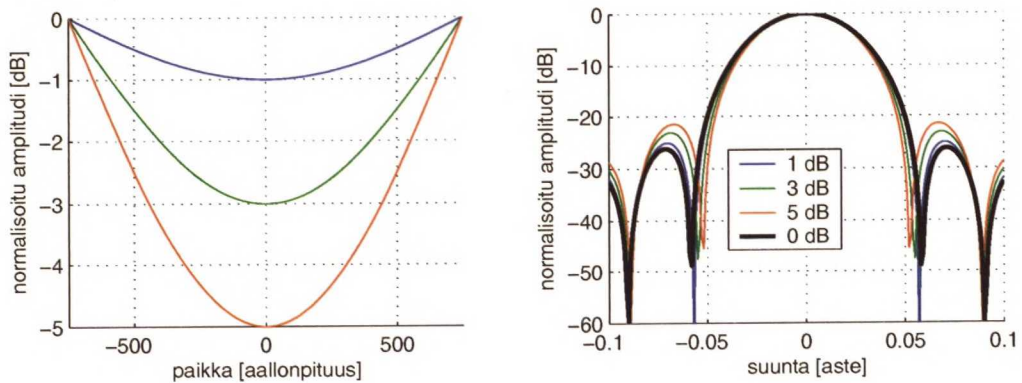
Tutkittavan antennin apertuurivalaisu on gaussinen ja sen reunavalaisu on -12 dB. Antennin apertuuri on pyörähdysymmetrinen ja apertuurin halkaisija on 1500λ . Kuvassa 5-6 on esitetty testiantennin apertuurijakauma ja sen suuntakuvio. Molemmat ovat pyörähdysymmetrisiä. Antennin -3 dB:n keilanleveys on $0,045^\circ$ ja ensimmäisten sivukeilojen taso on $-25,8$ dB.



Kuva 5-6. Testiantennin apertuurijakauma ja suuntakuvio.

5.2.2 Hiljaisen alueen epäideaalisen amplitudin vaikutus

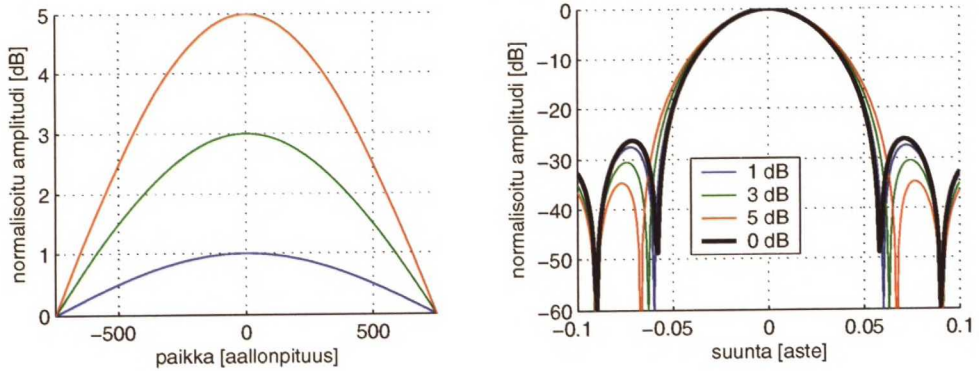
Hiljaisen alueen amplitudissa olevan kuopan vaikutusta antennin mitattuun suuntakuvioon tutkittiin kolmen testitapauksen avulla. Kuoppien suuruudet ovat -1 dB, -3 dB ja -5 dB. Kuopat ovat sinin puolikkaan jakson muotoisia logaritmisella asteikolla. Kentän amplitudi on pyörähdysymmetrinen ja vaihe vakio. Kuvassa 5-7 on esitetty hiljaisen alueen amplitudit ja suuntakuviot, jotka saataisiin mittaamalla testitapauksen antenni epäideaalisissa hiljaisissa alueissa.



Kuva 5-7. Hiljaisen alueen kentän amplitudissa olevan kuopan vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuvioon. Oikealla on esitetty suuntakuviot, jotka saataisiin mittaamalla testitapauksen antenni vasemmalla esitetyissä hiljaisen alueen kentissä.

Jos suuntakuvio mitattaisiin hiljaisissa alueissa, joiden amplitudeissa on 1 dB:n, 3 dB:n ja 5 dB:n kuopat, -3 dB:n keilanleveydet pienentyisivät 1,1 %, 3,4 % ja 5,6 % sekä ensimmäiset sivukeilat olisivat nousseet 0,5 dB, 3,1 dB ja 4,8 dB vastaavasti todellisista arvoista. Voidaan siis päätellä, että mitä suurempi kuoppa hiljaisen alueen amplitudissa on, sitä kapeampi on mitattu pääkeila ja sitä korkeammat ovat sivukeilat.

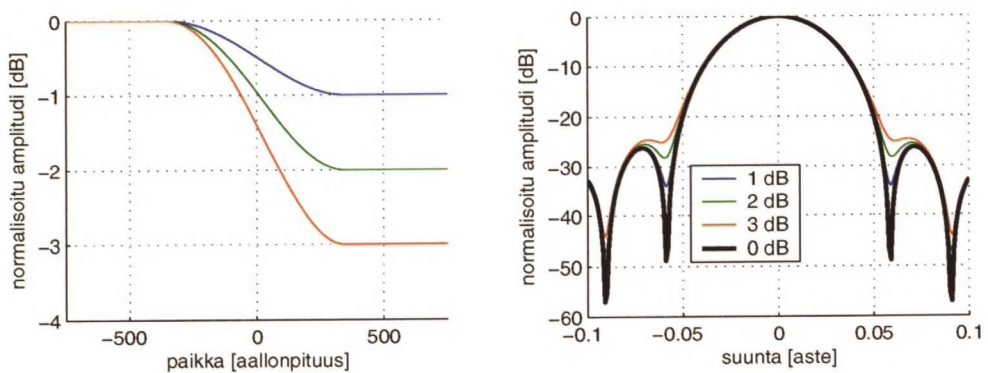
Hiljaisen alueen amplitudissa olevan kuvun vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuviin on esitetty kuvassa 5-8. Kupujen korkeudet ovat 1 dB, 3 dB ja 5 dB. Kuvat ovat sinin puolikkaan jakson muotoisia logaritmisella asteikolla. Kentän amplitudi on pyörähdyssymmetrinen ja vaihe vakio.



Kuva 5-8. Hiljaisen alueen kentän amplitudissa olevan kuvun vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuviin. Oikealla on esitetty suuntakuviot, jotka saataisiin mittaamalla testitapauksen antenni vasemmalla esitetyissä hiljaisen alueen kentissä.

Jos suuntakuvi mitattaisiin hiljaisissa alueissa, joiden amplitudeissa on 1 dB:n, 3 dB:n ja 5 dB:n kuvat, -3 dB:n keilanleveydet kasvaisivat 1,2 %, 4,0 % ja 6,7 % sekä ensimmäiset sivukeilat laskisivat 1,3 dB, 4,3 dB ja 8,4 dB vastaavasti todellisista arvoista. Hiljaisen alueen amplitudissa olevalla kuvulla on siis päinvastainen vaikutus kuin kuopalla: mitä suurempi kupu hiljaisen alueen amplitudissa on, sitä leveämpi on mitattu pääkeila ja sitä matalammat ovat sivukeilat.

Kuvassa 5-9 on esitetty hiljaisessa alueessa olevan amplitudihypyn vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuviin. Amplitudihyppy on kosinin puolikkaan jakson muotoinen lineaarisella asteikolla. Toisessa suunnassa hiljaisen alueen amplitudi on vakio.



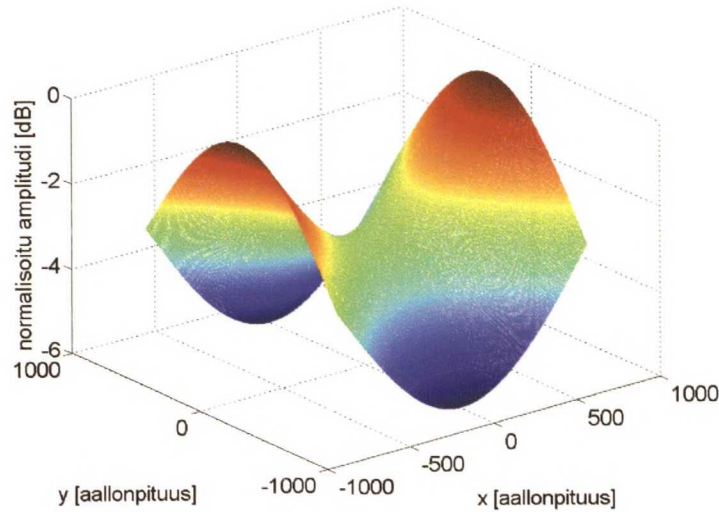
Kuva 5-9. Hiljaisen alueen kentässä olevan amplitudihypyn vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuviin. Oikealla on esitetty suuntakuviot, jotka saataisiin mittaamalla testitapauksen antenni vasemmalla esitetyissä hiljaisen alueen kentissä.

Mitä suurempi hyppy hiljaisen alueen amplitudissa on, sitä enemmän mittaamalla saatavan suuntakuvion ensimmäinen minimi on täytynyt. Suuntakuvion seuraaviin minimeihin hiljaisen alueen amplitudissa olevalla hypyllä ei ole yhtä suurta vaikutusta.

Myös hiljaisen alueen amplitudissa olevan satulapinnan vaikutusta mitattuun suuntakuviin tutkittiin kolmen testitapausten avulla. Testitapausten hiljaisten alueiden amplitudeissa on kuoppa vaakasuunnassa ja kupu pystysuunnassa. Kenttien amplitudin muoto noudattaa yhtälöä

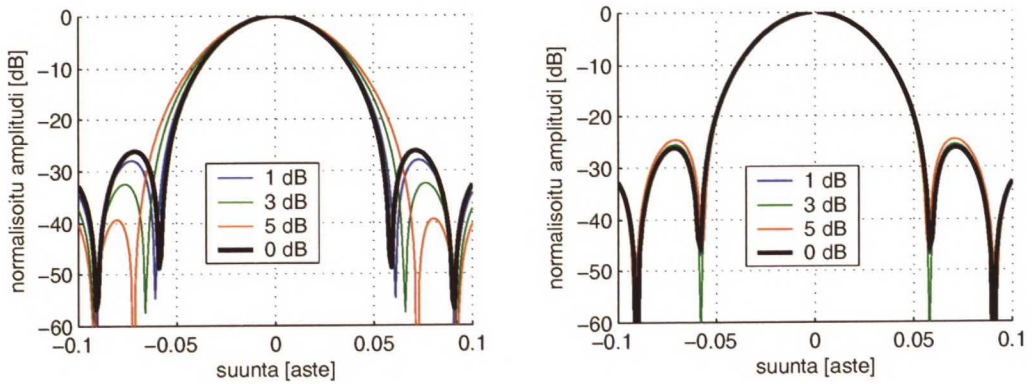
$$20 \log |E_{qz}| = \cos\left(x \frac{\pi}{D}\right) - \cos\left(y \frac{\pi}{D}\right), \quad (5.1)$$

jossa $D = 1500 \lambda$ on antennin apertuurin halkaisija ja $|E_{qz}|$ on amplitudivaihtelun suuruus. Testitapauksissa amplitudivaihtelu hiljaisen alueen keskeltä mitattuna on $\pm 1 \text{ dB}$, $\pm 3 \text{ dB}$ ja $\pm 5 \text{ dB}$. Kuvassa 5-10 on esitetty yhden testitapausten amplitudin satulapinta. Amplitudissa on -3 dB :n kuoppa vaakasuunnassa ja 3 dB :n kupu pystysuunnassa.



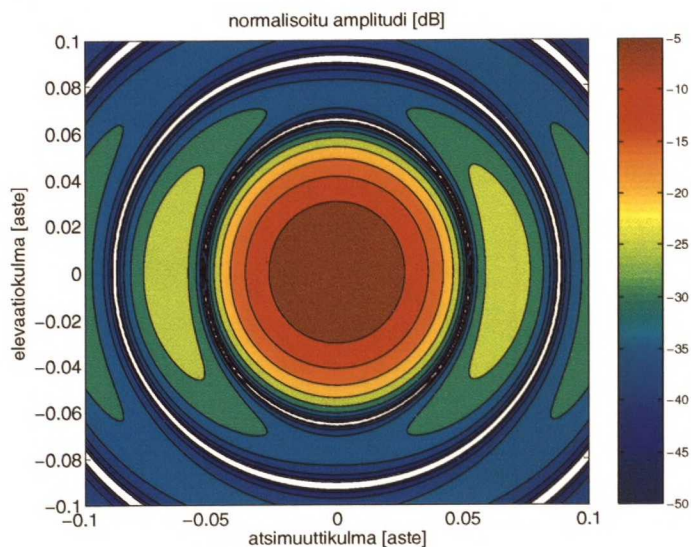
Kuva 5-10. Esimerkki hiljaisen alueen amplitudin satulapinnasta.

Kuvassa 5-11 on esitetty hiljaisen alueen satulapinnan vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuviin.



Kuva 5-11. Hiljaisen alueen amplitudin satulapinnan vaikutus mittaamalla saatavan suuntakuvion vaaka- ja diagonaaleikkauksiin.

Diagonaaleikkauksiin näillä satulapinnoilla ei ole suurta vaikutusta. Vaakasuuntaisissa leikkauksessa -3 dB:n keilanleveydet ovat kasvaneet $1,78$ %, $5,78$ % ja $9,78$ % sekä ensimmäiset sivukeilat laskeneet $-1,8$ dB, $-6,2$ dB ja $-13,1$ dB. Pystysuuntaisissa leikkauksissa -3 dB:n keilanleveydet ovat pienentyneet $1,79$ %, $5,36$ % ja $8,93$ % sekä ensimmäiset sivukeilat nousseet $1,6$ dB, $4,3$ dB ja $6,6$ dB. Tämän perusteella amplitudin satulapinta toisessa suunnassa kaventaa mittaamalla saatavan suuntakuvion pääkeilaa sekä nostaa sivukeiloja ja toisessa suunnassa leventää pääkeilaa sekä madaltaa sivukeiloja. Kuvassa 5-12 on esitetty kaksiulotteinen suuntakuvio, joka saataisiin mittaamalla testitapauksen antenni hiljaisessa alueessa, jonka kentän amplitudissa on ± 3 dB:n satulapinta. Ideaalinen suuntakuvio on pyörähdysymmetrinen.

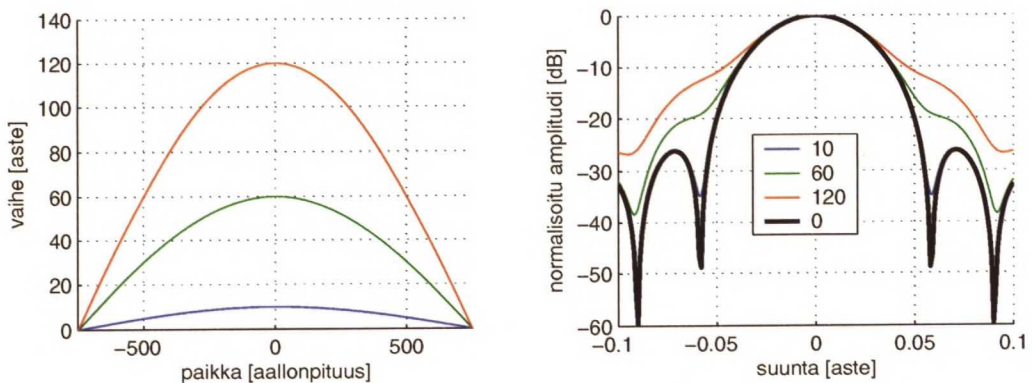


Kuva 5-12. Kaksiulotteinen suuntakuvio, joka saataisiin mittaamalla testitapauksen antenni hiljaisessa alueessa, jonka kentän amplitudissa on ± 3 dB satulapinta.

Todellisen pyörähdysymmetrisen pääkeilan sijasta mitattaisiin ellipsin muotoinen pääkeila. Aiemmin simuloitiin tapausta, jossa hiljaisen alueen amplitudissa oli kuoppa. Tässä tapauksessa 1dB:n, 3dB:n ja 5dB:n kuopat pienensivät -3 dB:n keilanleveyksiä 1,1 %, 3,4 % ja 5,6 % sekä nostivat ensimmäisiä sivukeiloja 0,5 dB, 3,1 dB ja 4,8 dB. Tämän perusteella satulapinnalla on suurempi vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuvioon kuin vain pelkällä kuvulla tai kuopalla.

5.2.3 Hiljaisen alueen epäideaalisen vaiheen vaikutus

Hiljaisen alueen kentän vaiheessa olevan kuvun vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuvioon on esitetty kuvassa 5-13. Kupujen suuruudet ovat 10° , 60° ja 120° . Kuvat ovat sinin puolikkaan jakson muotoisia. Kentän vaihe on pyörähdysymmetrinen ja amplitudi vakio.

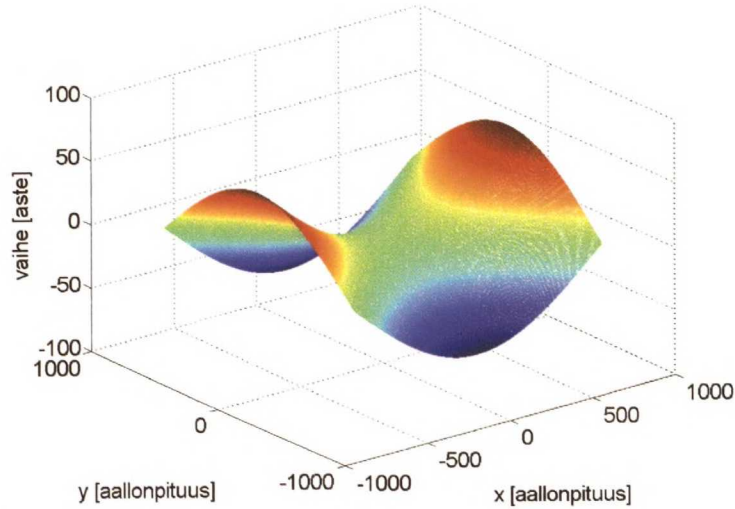


Kuva 5-13. Hiljaisen alueen kentän vaiheessa olevan kuvun vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuvioon. Oikealla on esitetty suuntakuviot, jotka saataisiin mittaamalla testitapauksen antenni vasemmalla esitetyissä hiljaisen alueen kentissä.

Kokeen perusteella hiljaisen alueen vaiheessa oleva pieni (10°) kupu täyttää mittaamalla saatavan suuntakuvion minimejä. Suuremmat kuvat täyttävät ensimmäisiä minimejä ja nostavat sivukeiloja niin paljon, että ensimmäisiä sivukeiloja ei voida erottaa pääkeilasta. Simulointien perusteella mitattu suuntakuvio on sama siitä riippumatta, onko hiljaisen alueen vaiheessa kupu vai samansuuruinen kuoppa. Ero tulee ainoastaan mitatun säteilykuvion vaiheeseen.

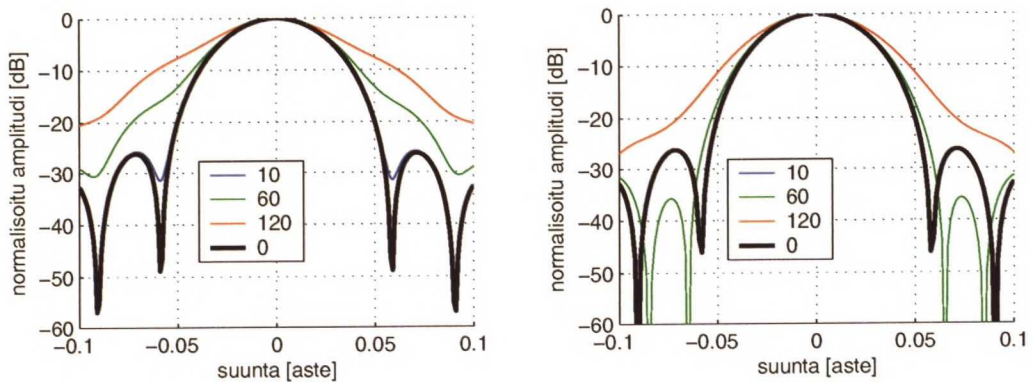
Hiljaisen alueen vaiheessa olevan satulapinnan vaikutusta mitattuun suuntakuvioon tutkittiin kolmen tapauksen avulla. Testitapausten hiljaisten alueiden vaiheissa on kuoppa vaakasuunnassa ja kupu pystysuunnassa. Hiljaisen alueen vaiheen muoto noudattaa yhtälöä (5.1). Testitapauksissa vaihevaihtelu hiljaisen alueen keskeltä mitattuna on $\pm 10^\circ$, $\pm 60^\circ$ ja $\pm 120^\circ$. Kuvassa 5-14 on esitetty yhden testitapauksen

hiljaisen alueen vaiheen satulapinta. Vaakasunnassa (x -koordinaatti) vaiheessa on 60° kuoppa ja pystysunnassa (y -koordinaatti) 60° kupu.



Kuva 5-14. Testitapauksen hiljaisen alueen vaiheen satulapinta.

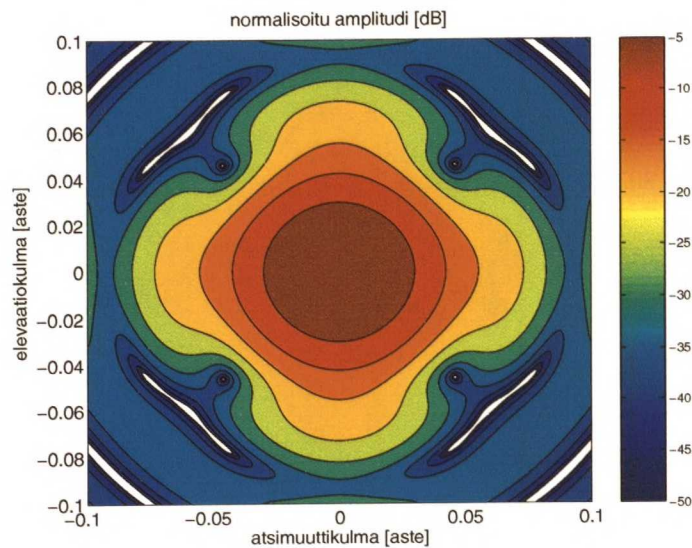
Kuvassa 5-15 on esitetty hiljaisen alueen vaiheen satulapinnan vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuviin. Mittaamalla saatavat suuntakuviot ovat samanlaisia vaaka- ja pystysunnissa.



Kuva 5-15. Hiljaisen alueen vaiheen satulapinnan vaikutus mittaamalla saatavan suuntakuviin vaaka- ja diagonaalileikkauksiin.

Satulapinnalla on hieman suurempi vaikutus mittaamalla saatavan suuntakuviin vaaka- ja pystyleikkauksiin kuin vain pelkällä hiljaisen alueen kentän vaiheessa olevalla kuvulla tai kuopalla. Satulapinnoilla on myös merkittävä vaikutus suuntakuviin diagonaalileikkaukseen. Hiljaisen alueen vaiheen 60° satulapinta nostaa ensimmäisiä sivukeiloja suuntakuviin vaakaleikkauksessa. Suuntakuviin diagonaalileikkauksessa sivukeilat ovat sen sijaan laskeneet. Tämä voidaan ymmärtää siten, että

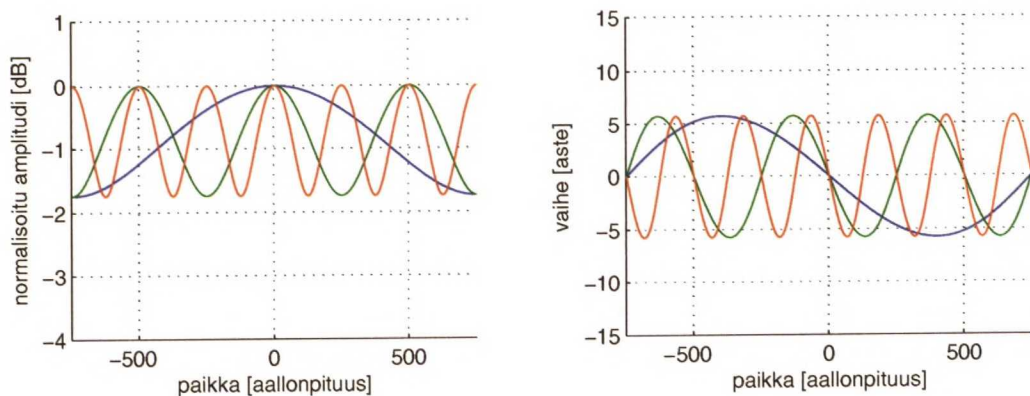
diagonaalileikkauksessa sivukeilojen suunnasta tulevat hiljaisen alueen tasoaaltospektrin komponentit summautuvat vastakkaisvaiheisina suunnasta 0° tulevan komponentin kanssa. Vaakasuuntaisessa leikkauksessa sivukeilojen suunnasta tulevat komponentit taas summautuvat samanvaiheisina. Kuvassa 5-16 on esitetty hiljaisen alueen 60° vaiheen satulapinnan vaikutus kaksiulotteiseen suuntakuvioon. Mittaamalla saatavan suuntakuvion pääkeila on leventynyt atsimuutti- ja elevaatio suunnissa.



Kuva 5-16. Kaksiulotteinen suuntakuva, joka saataisiin mittaamalla testitapauksen antenni hiljaisessa alueessa, jonka kentän vaiheessa on 60° satulapinta.

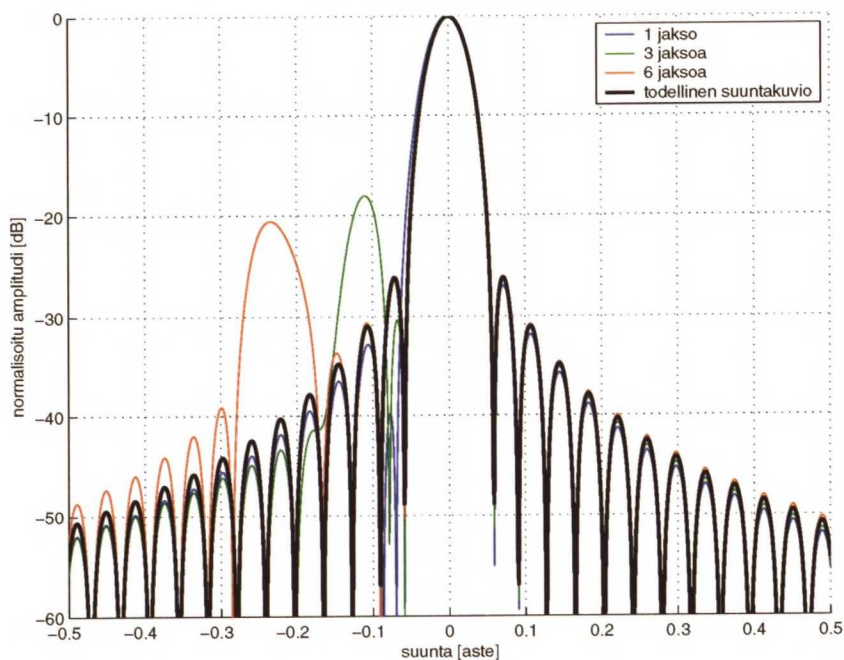
5.2.4 Hiljaisessa alueessa olevan jaksollisen häiriön vaikutus

Hiljaisen alueen amplitudissa ja vaiheessa saattaa olla jaksollisia häiriöitä. Häiriön aiheuttaa hiljaisen alueen kenttään summautuva häiriösignaali. Häiriön suuruudesta voidaan laskea häiriösignaalin amplitudi. Häiriöjaksojen määrä puolestaan kertoo häiriösignaalin tulosuunnan; mitä enemmän jaksoja hiljaisella alueella on, sitä suuremmasta kulmasta häiriösignaali tulee. Etenkin äärimmäisen suuntaavia antennoja mitattaessa ollaan erityisen kiinnostuneita suuntakuvion pääkeilan ympäristöstä. Tällöin hiljaiselle alueelle pienistä kulmista tulevat häiriöt haittaavat eniten mittausta. Tavallisesti antennin ensimmäinen nollakohta on suunnassa $1,2 \lambda / D \dots 2 \lambda / D$ apertuurin valaisusta riippuen. Tällöin hiljaisessa alueessa ovat häiriöt, joissa on vähemmän kuin kaksi jaksoa mitattavan antennin apertuurin alueella vaikuttavat antennin mitattuun pääkeilaan. Hiljaisen alueen häiriöiden jaksojen määrän vaikutusta mittaamalla saatavaan suuntakuvioon tutkittiin kolmen testitapauksen avulla. Testitapausten kentät on esitetty kuvassa 5-17.



Kuva 5-17. Hiljaisen alueen testikentät, joihin on lisätty jaksollinen häiriö.

Hiljaisiin alueisiin on lisätty tasoaaltokomponentit, jotka ovat -20 dB suoraan tulevan tasoaallon voimakkuudesta. Tämä aiheuttaa hiljaiseen alueeseen $1,74$ dB:n suuruisen amplitudivaihtelun ja $11,4^\circ$ suuruisen vaihevaihtelun huipusta huippuun. Vastaavat antennin mittaamalla saatavat suuntakuviot on esitetty kuvassa 5-18.

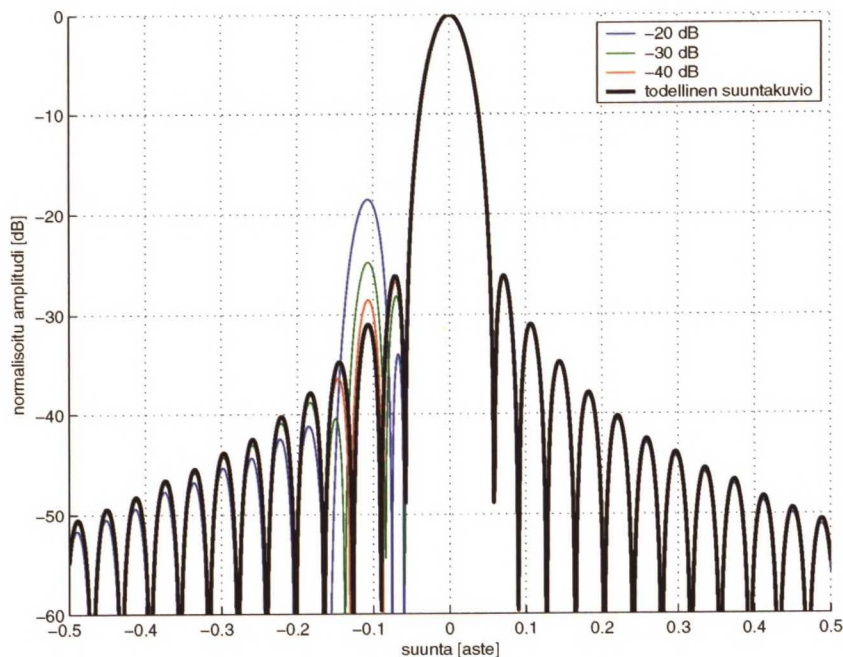


Kuva 5-18. Hiljaisen alueen jaksollisten häiriöiden vaikutus mittaamalla saataviin suuntakuviointiin.

Kuvasta 5-18 nähdään, että mitä enemmän hiljaisen alueen häiriössä on jaksoja, sitä kauemmas mitatusta pääkeilasta virhe syntyy. Kun hiljaisen alueen pituus on 1500λ ja siinä yksi häiriöjakso, vastaa se suunnasta $0,038^\circ$ tulevaa tasoaaltoa. Vastaavasti 3 ja 6

häiriöjaksoa kyseisessä hiljaisessa alueessa vastaavat suunnista $0,115^\circ$ ja $0,229^\circ$ tulevia tasoaaltoja.

Myös jaksollisen häiriön amplitudin vaikutusta antennin mitattuun suuntakuviioon tutkittiin kolmen testitapauksen avulla. Hiljaisiin alueisiin lisättiin suunnasta $0,108^\circ$ tulevia tasoaaltoja, joiden amplitudit olivat -20 dB , -30 dB ja -40 dB suoraan tulevasta tasoaallosta. Nämä aiheuttavat hiljaiseen alueeseen $1,74\text{ dB:n}$, $0,55\text{ dB:n}$ ja $0,17\text{ dB:n}$ amplitudivaihtelut sekä $5,71^\circ$, $3,62^\circ$ ja $1,15^\circ$ vaihevaihtelut huipusta huippuun. Kuvassa 5-19 on esitetty vastaavat suuntakuviot, jotka saataisiin mittaamalla testitapauksen antenni epäideaalisissa hiljaisissa alueissa.



Kuva 5-19. Eritasoisten häiriöiden vaikutus mittaamalla saatavaan suuntakuviioon.

Jos häiriösignaalin amplitudi on suuri ja mitataan antennia, jolla on matalat sivukeilat, on mitatussa suuntakuviossa sivukeila, jonka amplitudi on suunnilleen sama kuin häiriön amplitudi. Esimerkiksi testitapauksen -20 dB:n häiriön vuoksi mitattaisiin sivukeila, jonka taso on noin -20 dB . Kun häiriön amplitudi on sama kuin sen sivukeilan taso, jonka suunnasta häiriö tulee, nousee sivukeilataso noin 6 dB , mikä tarkoittaa vastaanotetun signaalin amplitudin kaksinkertaistumista. Tämän perusteella häiriösignaalin amplitudin pitäisi olla paljon pienempi kuin antennin sivukeilataso häiriön suunnassa. Jos esimerkiksi halutaan mitata antennin -30 dB:n sivukeila 1 dB:n tarkkuudella, ei sivukeilan suunnasta tulevan häiriön amplitudi saa olla yli $-48,3\text{ dB}$ suoraan tulevan tasoaallon voimakkuudesta.

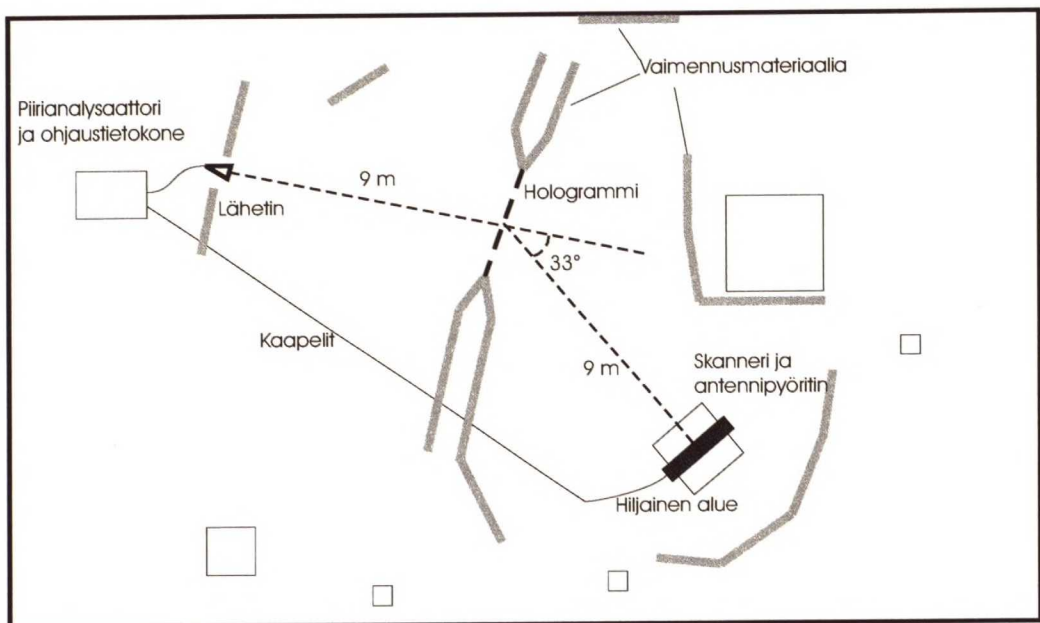
6 ADMIRALS RTO-antennin mittausten analysointi

ADMIRALS RTO-antennin (Representative Test Object) suuntakuvio mitattiin 322 GHz:n taajuudella TKK:n sähkö- ja tietoliikenneosaston suurjännitehalliin rakennetussa kompaktissa antennimittauspaikassa touko- ja kesäkuussa 2003. Ennen antennimittauksia hiljaisen alueen kentästä mitattiin vaaka- ja pystyleikkaus sekä molemmat diagonaaliset leikkaukset. Hiljaisen alueen mittausten perusteella hologrammin syöttöantenni säädettiin kohdalleen ja hologrammin toimintaa testattiin.

6.1 Mittausjärjestely ja suoritettut mittaukset

6.1.1 Mittausgeometria ja koordinaatisto

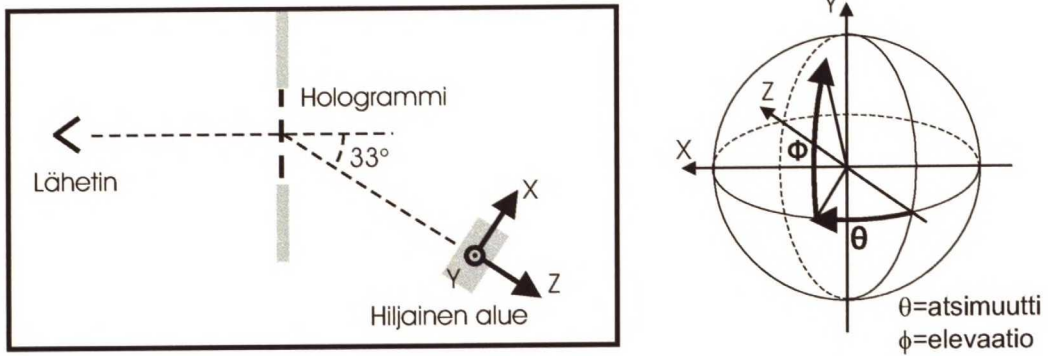
Hologrammiin perustuva kompakti antennimittauspaikka rakennettiin TKK:n sähkö- ja tietoliikenneosaston suurjännitehallin suureen huoneeseen, jonka mitat olivat 31 m x 19 m x 16 m. Mittauspaikan rakenne on esitetty kuvassa 6-1.



Kuva 6-1. ADMIRALS RTO-antennin mittaamista varten rakennetun hologrammiin perustuvan kompaktin antennimittauspaikan rakenne.

Heijastusten eliminoimiseksi huoneeseen rakennettiin vaimennusseiniä. Vaimennusmateriaalia laitettiin myös lattialle kriittisiin kohtiin.

Tässä työssä ADMIRALS RTO:n ja hiljaisen alueen mittausten osalta käytetty koordinaatisto on esitetty kuvassa 6-2.

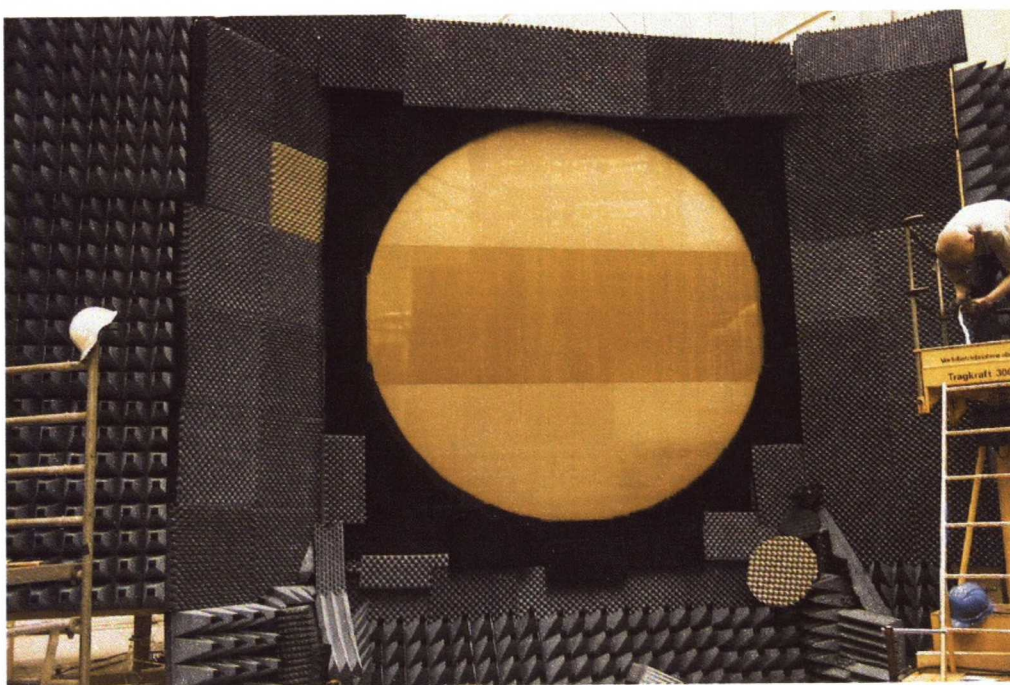


Kuva 6-2. ADMIRALS RTO:n ja hiljaisen alueen mittauksissa käytetty koordinaatisto.

Origo on keskellä hiljaista aluetta, positiivinen z-akseli osoittaa mitauspaikan tasoaallon etenemissuuntaan, y-akseli osoittaa ylöspäin ja x-akseli on näitä vastaan kohtisuorassa. Atsimuuttikulma on suuntaa osoittavan vektorin xz-tason projektion ja negatiivisen z-akselin välinen kulma. Atsimuuttikulma kasvaa negatiiviselta z-akselilta positiiviselle x-akselille päin ja on määritelty välillä $-180^\circ \dots 180^\circ$. Elevaatiokulma on suuntaa osoittavan vektorin ja xz-tason välinen pienin kulma. Elevaatiokulma kasvaa xz-tasolta positiiviselle y-akselille päin ja on määritelty välillä $-90^\circ \dots 90^\circ$.

6.1.2 Hologrammi

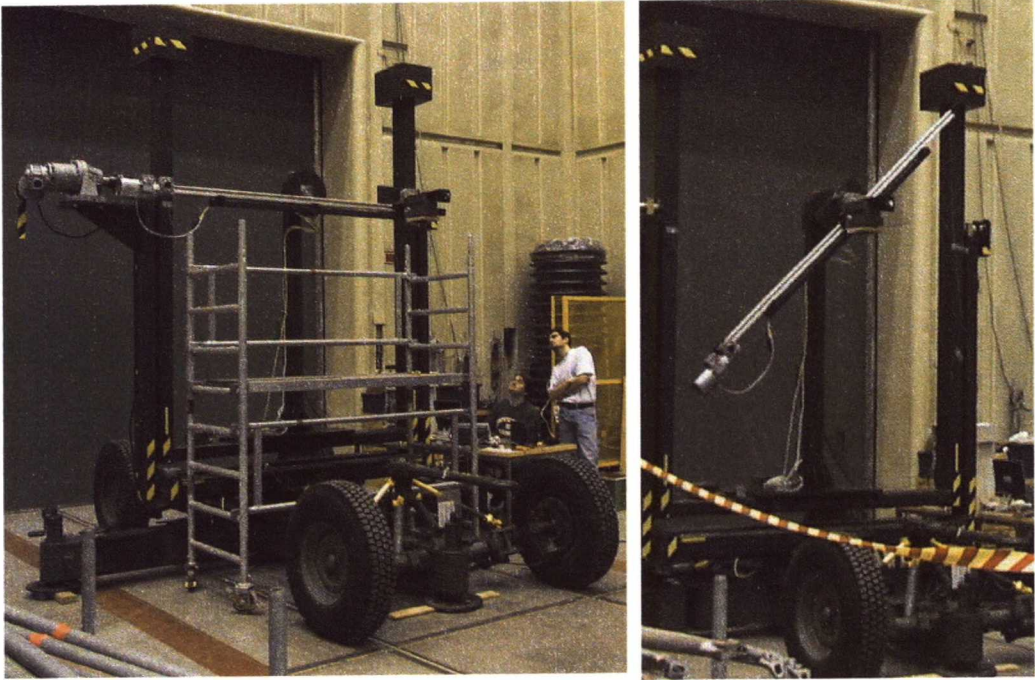
Mitattavan antennin pääheijastimen halkaisija on 1,5 m ja hiljaisen alueen oli oltava tätä suurempi. Tarpeeksi suuren hiljaisen alueen luomiseksi käytettiin binääristä amplitudihologrammia, jonka halkaisija oli 3 metriä ja polttoväli 9 metriä. Materiaali- ja valmistusteknisistä syistä hologrammi valmistettiin liittämällä kolme 1 m x 3 m -kokoista palaa yhteen. Palat kohdistettiin erityisten kohdistusmerkkien ja mikroskoopin avulla imupöydällä, jossa palat liitettiin toisiinsa juottamalla hologrammikuviossa olevat metalliliuskat yhteen. Hologrammi on esitetty kuvassa 6-3.



Kuva 6-3. ADMIRALS RTO:n mittauksissa käytetty hologrammi.

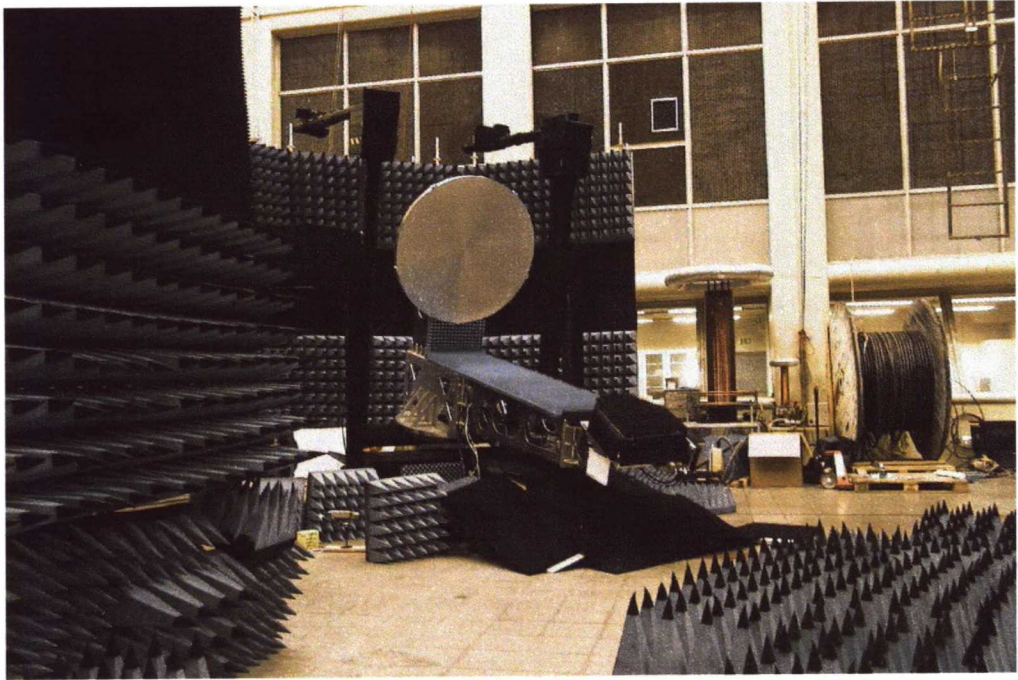
6.1.3 Hiljaisen alueen skanneri ja antennipyöritin

Hiljaisen alueen skanneri ja antennipyöritin rakennettiin Bofors-ilmatorjuntatykistä TKK:n koneensuunnittelun laboratoriossa. Hiljaisen alueen mittaamiseksi tykin jalustaan kiinnitettiin tuulimylly-tyyppinen skanneri. Näytteenottoantenni liitettiin 1,9 metriä pitkään lineaarisiirtimeen, jota voidaan pyörittää sen keskikohdan ympäri. Skannerilla voidaan mitata hiljaisen alueen vertikaalisen ja horisontaalisen leikkauksen lisäksi molemmat diagonaaliset leikkaukset. Hiljaisen alueen skanneri on esitetty kuvassa 6-4.



Kuva 6-4. Hiljaisen alueen skanneri.

Skannerin lineaarisiirtimen tasomaisuus mitattiin laserilla. Vaaka-asennossa lineaarisiirtimen tasomaisuuden virheeksi mitattiin noin 0,15 mm. Hiljaisen alueen mitattu vaihe korjattiin laskennallisesti tasomaisuuden mittaustulosten perusteella. Antennimittauksissa atsimuutti- ja elevaatiokulmien mittaamiseen käytettiin digitaalisia kulmamittareita, joiden tarkkuus on $0,0001^\circ$. Alkuperäisen atsimuuttivaihteiston toistotarkkuudeksi mitattiin $0,005^\circ$ ja välykseksi $0,15^\circ$. Suuren välyksen vuoksi mittaukset oli suoritettava aina samaan suuntaan. Antennipyörittimen atsimuuttikulman mittausalue on 360° ja elevaatiokulman $-12^\circ \dots 90^\circ$. Antennipyöritin on esitetty kuvassa 6-5.



Kuva 6-5. Antennin pyöritin ja ADMIRALS RTO-antenni.

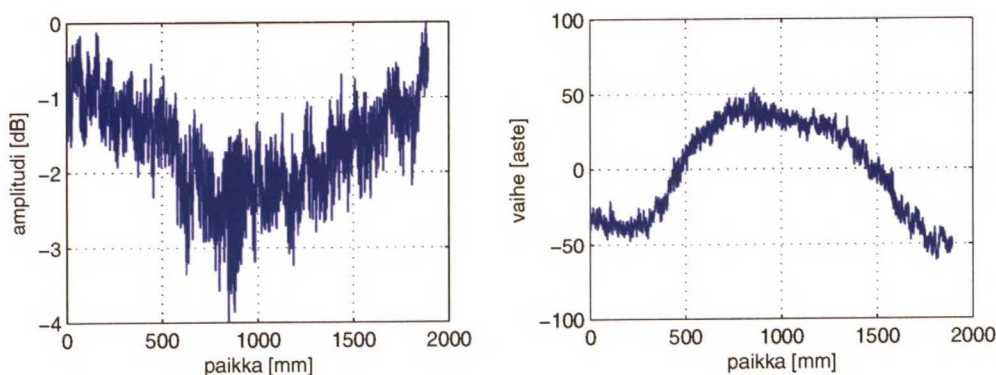
6.1.4 RF-instrumentointi

Hiljaisen alueen tutkimiseen käytettiin AB Millimetren MVNA-8-350-vektoriipiirianalysaattoria. Lähettimenä käytettiin ADMIRALS-antennin omaa lähetintä. Hiljaisen alueen mittauksissa vastaanottimena käytettiin ESA-2-vastaanotinta. Näytteenottoantennin kaapelin taipumisesta johtuvat vaihevirheet korjattiin viitteessä [28] esitetyllä menetelmällä. Antennimittauksissa vastaanottimena oli ADMIRALS-antennin oma vastaanotin ja spektrianalysaattori. Vastaanottimella pystyttiin mittaamaan pelkkä vastaanotettu teho.

6.2 Hiljaisen alueen analysointi

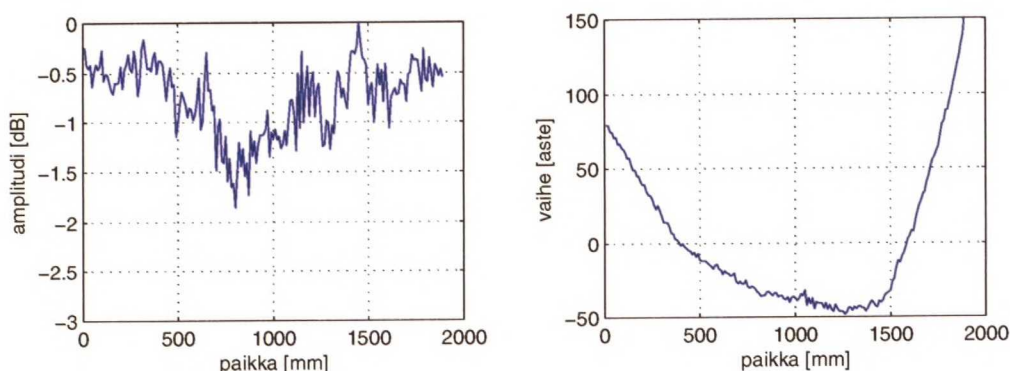
6.2.1 Mitattu hiljainen alue

Kuvassa 6-6 on esitetty vaakasuuntainen leikkaus mitatusta hiljaisen alueen amplitudista ja vaiheesta taajuudella 322 GHz. Näytepisteiden väli oli 0,45 mm ja näytteenottoantennina oli avoimen WR-3-aaltoputken pää.



Kuva 6-6. Vaakasuuntainen leikkaus hiljaisen alueen kentästä.

Vaakaleikkauksessa amplitudin vaihtelu on noin 4 dB ja vaiheen vaihtelu noin 100° huipusta huippuun. Kuvassa 6-7 on esitetty pystysuuntainen leikkaus hiljaisesta alueesta. Näytepisteiden väli on 10 mm ja näytteenottoantennina oli korrugoitu torvi.

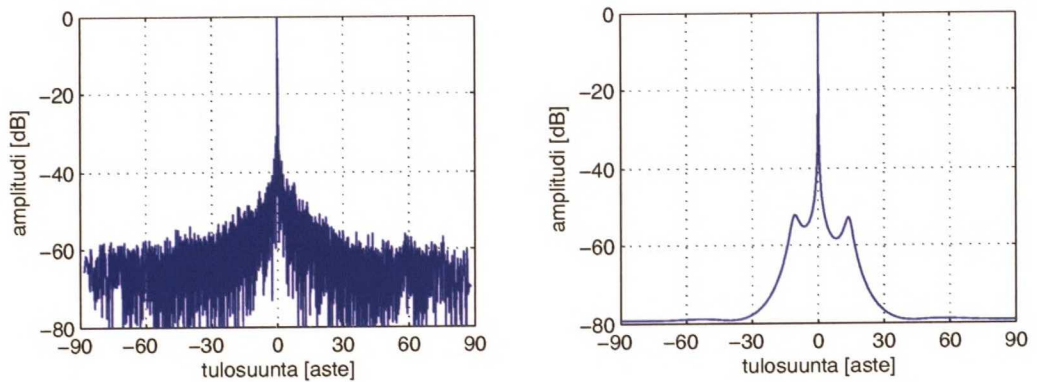


Kuva 6-7. Pystysuuntainen leikkaus hiljaisen alueen kentästä.

Pystysuuntaisessa leikkauksessa amplitudin vaihtelu on alle 2 dB ja vaiheen vaihtelu noin 200° huipusta huippuun. Skanneri ei ollut aivan tasomainen laser-mittausten perusteella, mutta molempien leikkausten vaiheet on korjattu laskennallisesti vastaamaan tasosta mitattuja vaiheita.

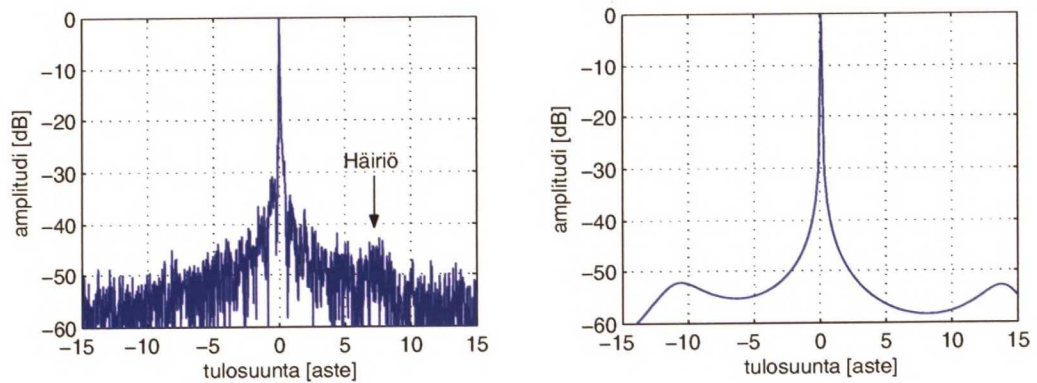
6.2.2 Hiljaisen alueen tasoaltospektri

Hiljaisen alueen laatuun vaikuttavia häiriölähteitä tutkittiin suuntaspektrin avulla. Suuntaspektri laskettiin sekä Fourier-muunnoksella että MUSIC-algoritmilla. Kuvassa 6-8 on esitetty vaakasuuntaisesta leikkauksesta lasketut suuntaspektrit. Yksiulotteisesta vaakasuuntaisesta näytteestä lasketussa suuntaspektrissä pystysuunnista tulevat häiriösignaalit projisoituvat vaakatasoon.



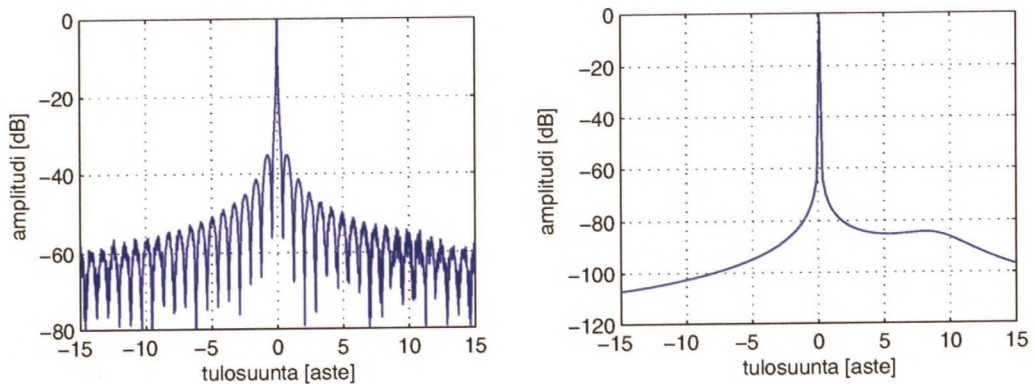
Kuva 6-8. Normalisoidut suuntaspektrit [dB] Fourier- muunnoksella ja MUSIC-algoritmilla.

Kuvassa 6-9 on esitetty suuntaspektrit välillä -15° ... 15° .



Kuva 6-9. Normalisoidut suuntaspektrit [dB] Fourier- muunnoksella ja MUSIC-algoritmilla.

Fourier-suuntaspektrissä nähdään häiriösignaali suunnassa 6° ... 8° . Koska häiriö tulee laajalta kulma-alueelta, voidaan sen olettaa olevan lähikentässä. MUSIC-suuntaspektrissä on sen sijaan häiriöt suunnissa $-10,5^{\circ}$ ja $13,7^{\circ}$. Fourier-muunnoksen ja MUSIC-algoritmin kykyä löytää lähikentästä tulevia häiriöitä testattiin numeerisesti testitapauksen avulla. Testitapauksen kenttä on näytteistetty 4206 pisteessä ja pisteiden välinen matka on 0,45 mm. Taajuus on 322 GHz ja testitapauksen kenttä muodostuu siihen kohtisuoraan tulevasta tasoaallosta, kohinasta, jonka keskipoikkeama on -40 dB tasoaallosta sekä lähikentässä olevasta häiriösignaalista. Häiriösignaalin lähde on 7° kulmassa näytteistetyn kentän keskikohdasta ja sen etäisyys on 10 metriä. Häiriölähde on ympärisäteilevä ja sen aiheuttama suurin kentänvoimakkuus hiljaisessa alueessa on -47 dB tasoaallosta. Näytteistetystä kentästä lasketut Fourier- ja MUSIC-suuntaspektrit on esitetty kuvassa 6-10.

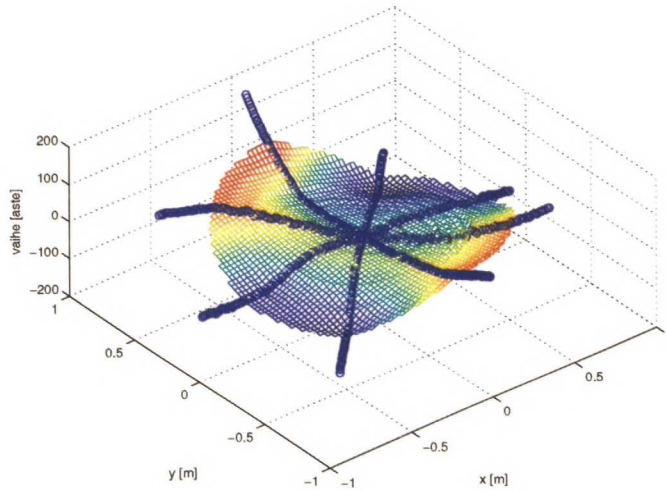


Kuva 6-10. Fourier-muunnoksen ja MUSIC-algoritmin kyky tunnistaa lähikentässä oleva häiriö.

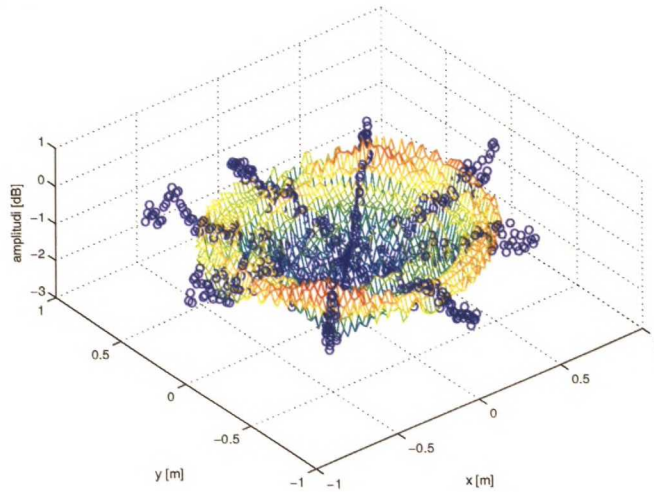
Esimerkin perusteella lähikentässä oleva häiriö näkyy Fourier-spektrissä laajalla kulma-alueella. MUSIC-algoritmi ei erota häiriötä selvästi ja sekin on koholla laajalla kulma-alueella. Laskennan tulokset muistuttavat todellisia mittaustaikan suuntaspektrejä, joten häiriön tai häiriöiden voidaan olettaa olevan lähikentässä. Muissa leikkauksissa kenttä näytteistettiin 10 mm:n välein. Näissä leikkauksissa alueen $-2,67^\circ \dots 2,67^\circ$ ulkopuolelta tulevat tasoaaltokomponentit ovat laskostuneet välille $-2,67^\circ \dots 2,67^\circ$. Laskostuneita tasoaaltokomponentteja on mahdotonta suodattaa näytteestä joten näytteistä ei saada selville todellista suuntaspekttriä.

6.2.3 Hiljaisen alueen kaksiulotteisen kentän laskeminen mitattujen leikkausten perusteella

Hiljaisesta alueesta mitattiin vaaka- ja pystyleikkausten lisäksi molemmat diagonaalileikkaukset. Näiden leikkausten perusteella interpoloitiin hiljaisen alueen kenttä antennin apertuurin alueella. Sekä kentän vaihe että amplitudi interpoloitiin erikseen käyttäen lineaarista interpolointia napakoordinaatistossa. Lopuksi napakoordinaateissa olevat kentän arvot interpoloitiin karteesiseen koordinaatistoon. Lineaarisirrinn, jolla hiljaisen alueen näytteenottoantennia liikutettiin, ei pysynyt samassa tasossa eri kiertokulmilla, joten eri leikkausten vaiheet jouduttiin suoristamaan laskennallisesti. Eri leikkausten mitatut vaiheet myös normalisoitiin niin, että kaikissa vaihe on sama hiljaisen alueen keskellä. Amplitudiin lineaarisiirtimen epätasomaisuudella ei oletettu olevan vaikutusta. Interpoloidun hiljaisen alueen vaihe on esitetty kuvassa 6-11 ja amplitudi kuvassa 6-12.



Kuva 6-11. Leikkauksista interpoloimalla lasketun hiljaisen alueen vaihe antennin apertuurin alueella.

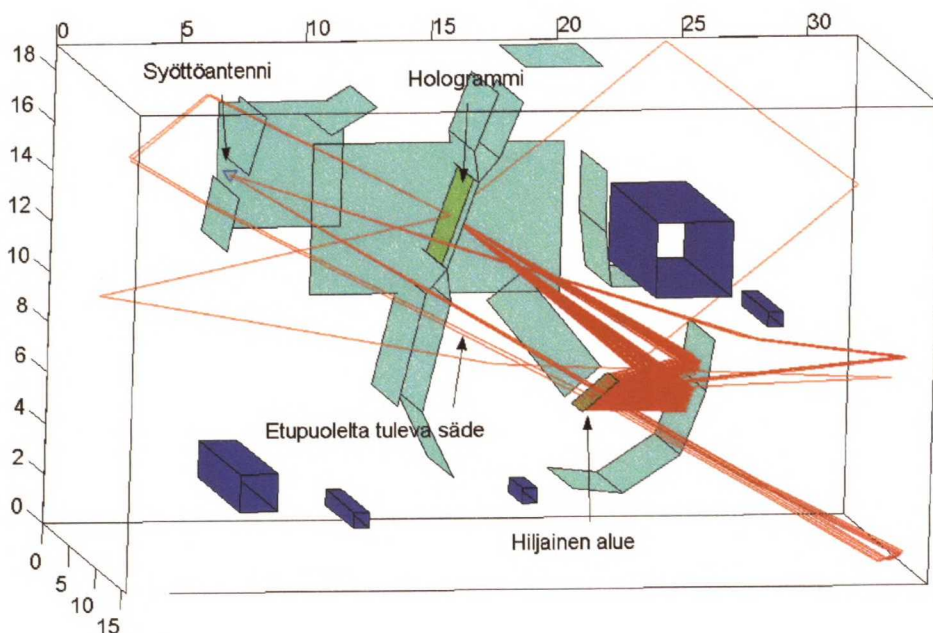


Kuva 6-12. Leikkauksista interpoloimalla lasketun hiljaisen alueen amplitudi antennin apertuurin alueella.

Alkuperäiset mitatut kentän arvot on merkitty kuvissa renkailla. Antennin apertuurin alueella suurin vaihevaihtelu on 141° ja amplitudivaihtelu 2,1 dB huipusta huippuun.

6.2.4 Mittauspaikan häiriötason simulointi säteenseurantaan perustuvalla ohjelmalla

Mittauspaikan häiriösignaalien tulosuuntien ja voimakkuuksien selvittämiseksi mittauspaikassa tapahtuvia heijastuksia simuloitiin säteenseurantaan perustuvalla ohjelmalla [29]. Kuvassa 6-13 on esitetty simuloinneissa käytetty mittauspaikan malli huoneen katosta katsottuna. Kuvaan on piirretty voimakkaimmat hiljaiselle alueelle osuvat säteet.



Kuva 6-13. Hiljaiselle alueelle osuvat säteet.

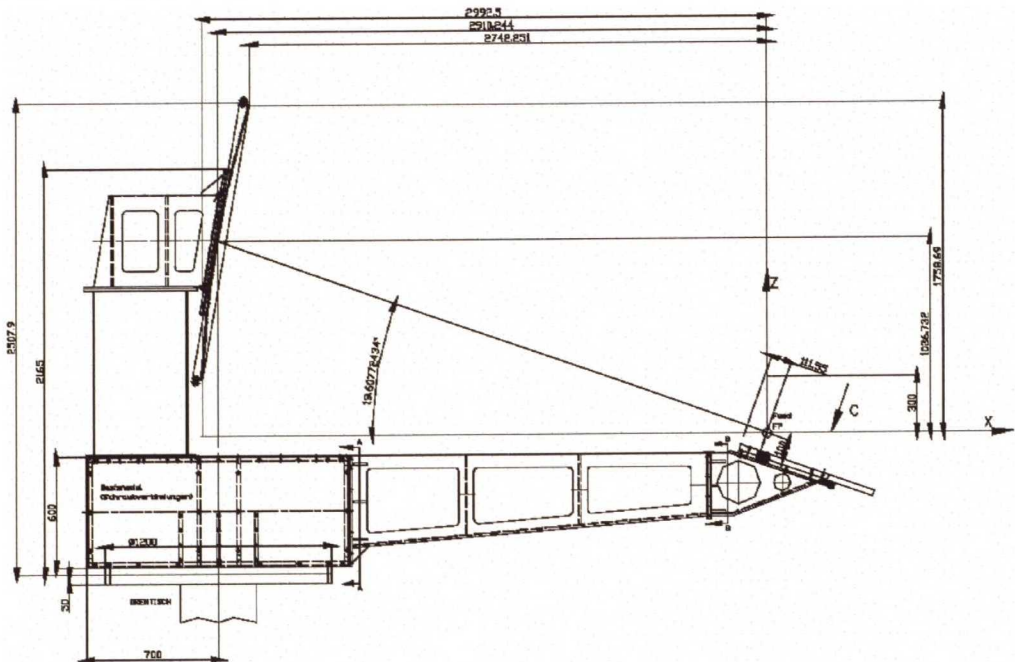
Simuloinnin perusteella voimakkain hiljaiselle alueelle osuva säde on -13 dB tasoaallon voimakkuudesta. Voimakkaimmat säteet tulevat hiljaiselle alueelle takapuolelta. Ne saattavat vääristää mittausta, mikäli ne osuvat pääheijastimen ohi suoraan kvasioptiseen antennin syöttöön. Kuvaan on merkitty tässä simuloinnissa ainoa hiljaisen alueen etupuolelta tuleva säde. Sen voimakkuus on noin -40 dB tasoaallon voimakkuudesta ja atsimuuttitasolle projisoitu tulokulma on noin -22° . Säde heijastuu hologrammilta ja osuu kahden mittauspaikan seinän ja katon kautta hiljaiselle alueelle. Tämän voimakkuuksinen säde aiheuttaisi hiljaisen alueen vaiheeseen noin 1° vaihtelun ja amplitudiin noin $0,17$ dB vaihtelun huipusta huippuun. Simuloinnissa käytettiin 40000 sädettä. Vaimennuslevyjen tehon heijastuskerroin oli $0,1$ ja muiden pintojen tehon heijastuskerroin oli $0,9$.

Tämän simuloinnin perusteella hologrammin toiminta vaikuttaa hiljaisen alueen laatuun enemmän kuin ympäristöstä heijastuneet häiriöt. Tosin tässä ei mallinnettu hologrammille osuvia heijastuneita ja läpäisseitä säteitä välttämättä oikein. Todellisuudessa hologrammin kautta hiljaiselle alueelle tuleva häiriösignaali saattaa olla merkittävä.

6.3 ADMIRALS RTO:n suuntakuvion mittaaminen

6.3.1 ADMIRALS RTO-antenni

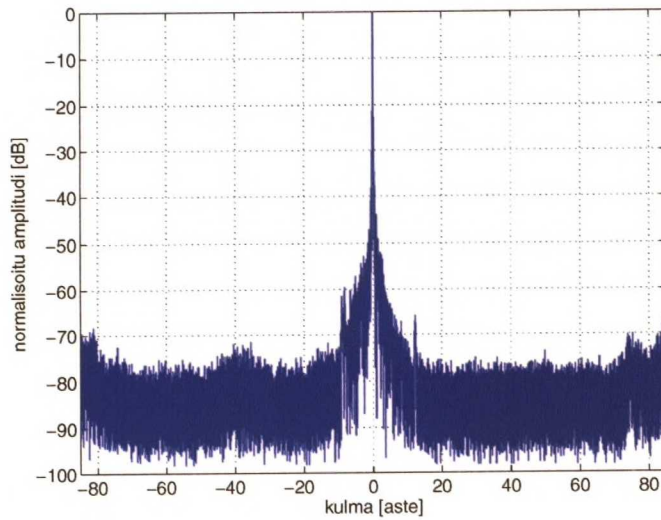
ADMIRALS RTO-antenni (representative test object) on alimillimetrialueella toimiva sivusta syötetty paraboloidiantenni. Pääheijastimen halkaisija on 1,5 metriä ja polttoväli kolme metriä. Pääheijastimen polttopisteessä oleva syöttö on kvasioptinen. Antennin rakenne on esitetty kuvassa 6-14.



Kuva 6-14. ADMIRALS RTO:n rakenne [2].

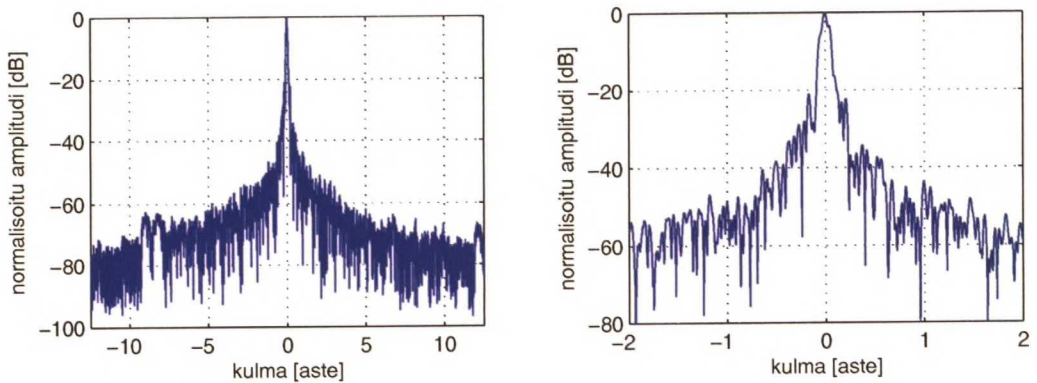
6.3.2 ADMIRALS RTO:n mitattu suuntakuvio

ADMIRALS RTO:n mitattu suuntakuvio atsimuuttitasossa on esitetty kuvassa 6-15.



Kuva 6-15. Mitattu suuntakuvio atsimuuttitasossa.

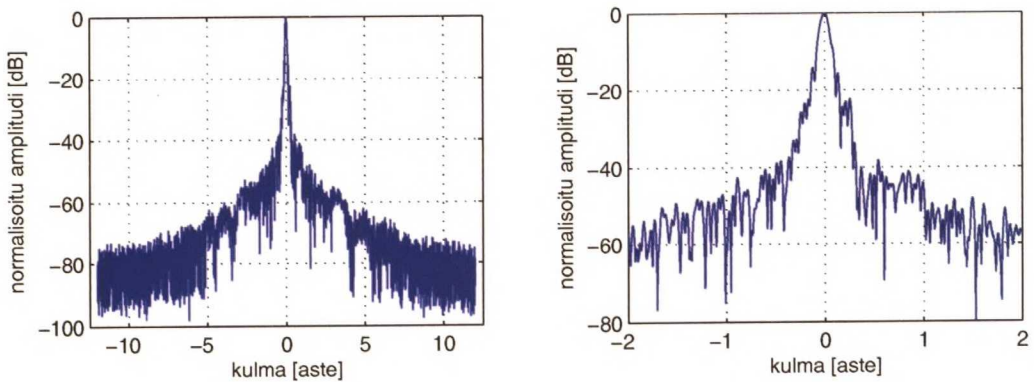
Kuvassa 6-16 on esitetty suuntakuvio $\pm 12^\circ$ ja $\pm 2^\circ$ atsimuuttialueissa.



Kuva 6-16. Mitattu suuntakuvio atsimuuttitasossa.

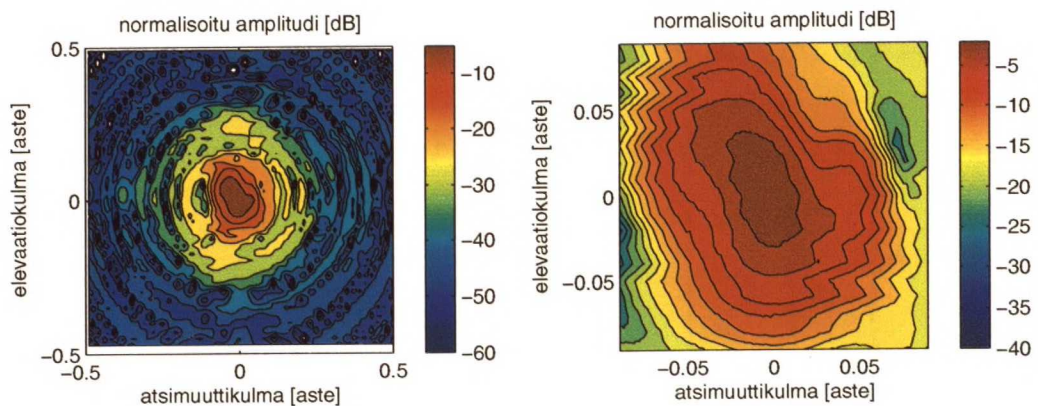
Kuvassa 6-16 nähdään mahdolliset häiriöt suunnissa 12° ja $-8^\circ \dots -9^\circ$. Mittauspaikan suuntaspektrissä oli häiriösignaali suunnassa $6^\circ \dots 8^\circ$, mikä on saattanut aiheuttaa antennin suuntakuviossa kohdassa $-8^\circ \dots -9^\circ$ olevan häiriön. Mitatussa suuntakuviossa olevia häiriöitä tutkittiin siirtämällä hologrammin syöttöä 30 mm ja mittaamalla suuntakuvio uudestaan. Suunnassa 12° oleva häiriö siirtyi noin $0,2^\circ$, kun taas suunnassa $-8^\circ \dots -9^\circ$ ollut häiriö pysyi paikallaan. Tästä voidaan päätellä, että suunnassa $8^\circ \dots 9^\circ$ ollut häiriö liittyi todennäköisesti mittauspaikkaan, kun taas suunnassa 12° ollut häiriö liittyi todennäköisemmin ADMIRALS RTO:hon tai hologrammiin [30].

Kuvassa 6-17 on esitetty ADMIRALS RTO:n mitattu suuntakuvio elevaatiotasossa.



Kuva 6-17. Mitattu suuntakuvio elevaatiotasossa.

Suuntakuviossa ei elevaatiotasossa näy häiriöitä kohdassa $0,9^\circ$ olevan pienen portaan lisäksi. Kuvassa 6-18 on esitetty ADMIRALS RTO:n kaksiulotteinen mitattu suuntakuvio.



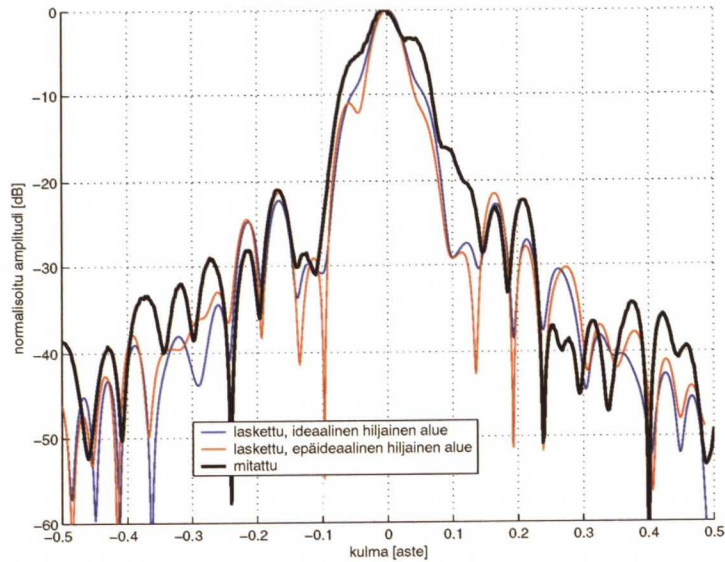
Kuva 6-18. ADMIRALS RTO:n mitattu kaksiulotteinen suuntakuvio.

Mitattu pääkeila on ellipsin muotoinen, vaikka tavallisesti paraboloidiantennin pääkeila on lähes pyöreä.

6.3.3 ADMIRALS RTO:n simuloidut suuntakuviot

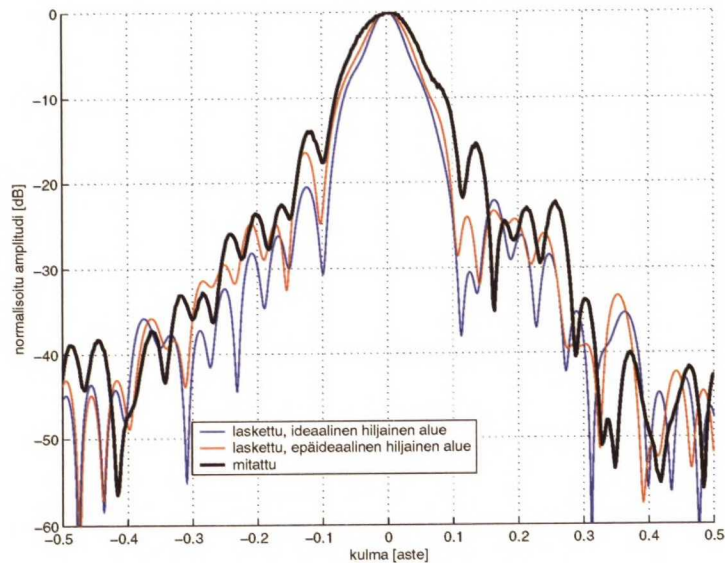
ADMIRALS RTO:n valmistaja EADS Astrium on mitannut antennin pääheijastimen pinnan muodon. Mitatun pinnan muodon perusteella laskettiin ADMIRALS RTO:n apertuurin kenttä GRASP8W-ohjelmalla taajuudella 322 GHz. Laskennassa on jätetty antennin muut epäideaalisuudet, kuten tukirakenteet huomiotta [31]. Tästä simuloidusta apertuurikentästä laskettiin antennin säteilemä kaukokenttä. Lisäksi laskettiin, minkälainen olisi mitattu suuntakuvio, jos antenni, jolla on simuloidun ADMIRALS RTO:n apertuurikenttä, mitattaisiin luvussa 6.2.3 esitetystä hiljaisen alueen

leikkauksista interpoloidussa kentässä. Atsimuuttitason suuntakuviot on esitetty kuvassa 6-19. Kuvassa on myös mitattu atsimuuttitason suuntakuvio.



Kuva 6-19. ADMIRALS RTO:n mitattu ja simuloidut suuntakuviot atsimuuttitasossa.

Kuvassa 6-20 on esitetty samat suuntakuviot elevaatiotasossa.

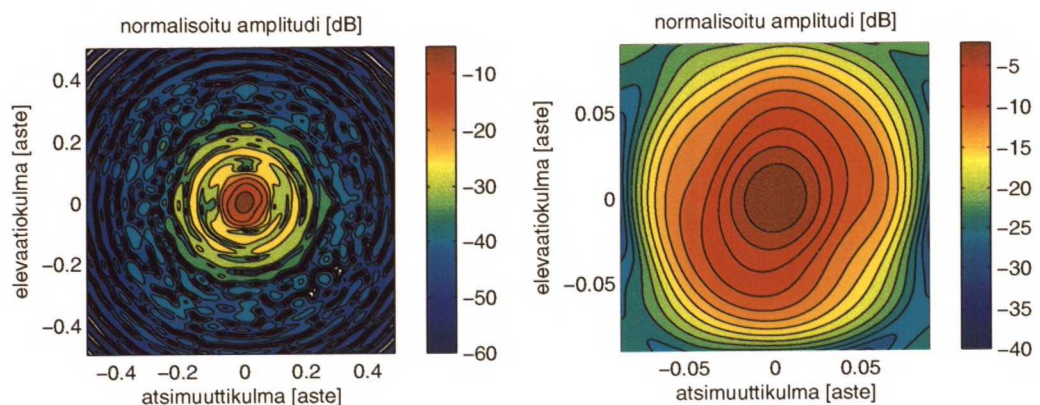


Kuva 6-20. ADMIRALS RTO:n mitattu ja simuloidut suuntakuviot elevaatiotasossa.

Hiljainen alue muuttaa simuloidun suuntakuvion pääkeilaa ($-0,1^{\circ} \dots 0,1^{\circ}$) atsimuuttitasossa enimmillään noin 3 dB. Elevaatiotasossa hiljainen alue ei muuta simuloidun pääkeilan muotoa, mutta suurentaa -3 dB:n keilan leveyttä noin 26 %. Simuloituihin sivukeiloihin epäideaalisella hiljaisella alueella on suurempi vaikutus.

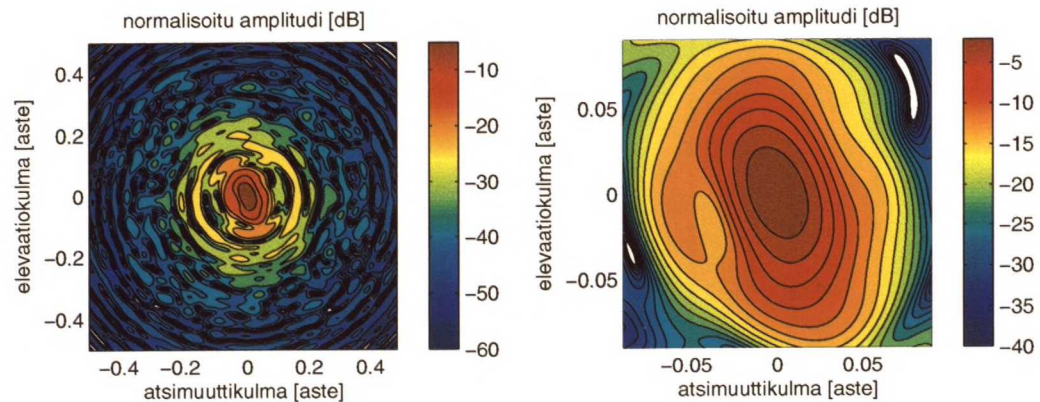
Hiljaisen alueen vaikutuksesta simuloitu suuntakuvio muuttuu lähemmäs mitattua suuntakuviota sekä atsimuutti- että elevaatiotasossa. Suurin ero mitatun ja simuloitujen suuntakuvioden välillä on mitatun suuntakuvion atsimuuttitasossa olevat pääkeilan olkapäät suunnissa $-0,04^\circ$ ja $0,04^\circ$. Olkapäiden kohdalla mitattu ja simuloitu suuntakuvio poikkeavat enimmillään noin 6 dB.

Kuvassa 6-21 on esitetty ADMIRALS RTO:n mitattujen peilin pinnan muotojen perusteella simuloitu kaksiulotteinen suuntakuvio.



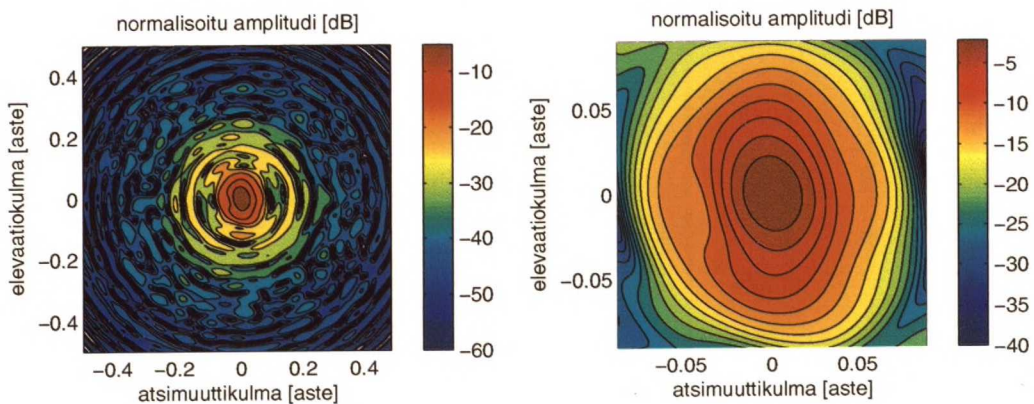
Kuva 6-21. ADMIRALS RTO:n mitattujen pinnan muotojen perusteella laskettu suuntakuvio.

Lasketussa suuntakuviossa pääkeilan korkein huippu on pyöreä, mutta alempana pääkeila muistuttaa enemmän ellipsiä. Ellipsi ei kuitenkaan ole aivan samaan suuntaan kallellaan kuin mitatussa suuntakuviossa. Kuvassa 6-22 on esitetty ADMIRALS RTO:n simuloitu suuntakuvio, joka saataisiin mittaamalla edellisen suuntakuvion omaava antenni mitatuista hiljaisen alueen leikkauksista interpoloidussa kentässä.



Kuva 6-22. Suuntakuvio, joka saataisiin mittaamalla ADMIRALS RTO:n lasketun suuntakuvion omaava antenni mitatun hiljaisen alueen leikkauksista interpoloimalla lasketussa kentässä.

Kuvan 6-22 suuntakuvio muistuttaa hyvin paljon mitattua suuntakuviota. Interpoloitu hiljainen alue on tehnyt pääkeilasta ellipsin, joka on kallellaan samaan suuntaan kuin mitatussa suuntakuviossa. Vertailun vuoksi laskettiin vielä, minkälainen olisi simuloitu suuntakuvio, jos se olisi mitattu hiljaisessa alueessa, joka on muuten interpoloidun hiljaisen alueen kaltainen, mutta jonka amplitudi- ja vaihevaihtelu on puolet interpoloidun hiljaisen alueen amplitudi- ja vaihevaihteluista (kuva 6-23).



Kuva 6-23. Suuntakuvio, joka saataisiin mittaamalla ADMIRALS RTO:n lasketun suuntakuvion omaava antenni hiljaisessa alueessa, jonka amplitudi- ja vaihevaihtelut ovat puolet interpoloidun kentän amplitudi- ja vaihevaihteluista.

Kuvassa 6-23 pääkeila on pystyssä olevan ellipsin muotoinen, mikä oli oletettavaa, koska simuloitun suuntakuvion pääkeila on oikealle kallellaan oleva ellipsi, joka epäideaalisen hiljaisen alueen vaikutuksesta muuttuu vasemmalle kallellaan olevaksi ellipsiksi. Tästä voidaan päätellä, että interpoloitu hiljainen alue venyttää mitattua pääkeilaa vasemmalle vinossa olevaksi ellipsiksi.

6.4 Johtopäätökset antennimittauksesta

6.4.1 Mittauspaikan häiriöiden tunnistaminen

Mitattujen leikkausten perusteella hiljaisen alueen amplitudivaihtelu oli huipusta huippuun noin 2 dB ja vaihevaihtelu huipusta huippuun noin 140° ADMIRALS RTO:n apertuurin alueella. Hiljaisen alueen atsimuuttitason suuntaspektrissä havaittiin häiriö suunnassa noin $6^\circ \dots 8^\circ$. Sama häiriö näkyi myös mitatussa antennin suuntakuviossa kohdassa $-8^\circ \dots -9^\circ$. Suuntaspektrin ja suuntakuvion häiriöiden suunnissa on eri etumerkki, koska positiivisesta suunnasta tuleva häiriö vaikuttaa mitatun suuntakuvion negatiiviselle kulman alueelle ja päinvastoin. Häiriön suunnan perusteella se tulee hologrammikuvioinnin reunasta. Mitatussa suuntakuviossa havaittiin häiriö suunnassa noin 12° . Tätä häiriötä ei kuitenkaan näkynyt suuntaspektrissä. Häiriön suunta myös

muuttui, kun syöttöantennia siirrettiin hieman sivuun joten kyseessä on ADMIRALS RTO-antennin sivukeila.

6.4.2 Hiljaisen alueen laadun vaikutus ADMIRALS RTO:n mitattuun suuntakuvioon

Simuloidun suuntakuvion pääkeilan taso muuttui epäideaalisen hiljaisen alueen vaikutuksesta enimmillään 3 dB pääkeilan alueella. Epäideaalisen hiljaisen alueen vaikutus sivukeiloihin on suurempi. Ero simuloidun ja mitatun suuntakuvion välillä on suurempi, kuin mikä oli epäideaalisen hiljaisen alueen vaikutus simuloituun suuntakuvioon. Mitatun antennin säteily ei siis vastaa simuloitua. Epäideaalisen hiljaisen alueen vaikutuksesta simuloitu suuntakuvio muuttui kuitenkin lähemmäs mitattua suuntakuviota. Parhaiten tämä käy ilmi kaksiulotteisista suuntakuvioista. Mitatun suuntakuvion pääkeila oli ellipsin muotoinen. Hiljaisen alueen vaikutuksesta myös simuloidun suuntakuvion pääkeila muuttui elliptisemmäksi ja oli samaan suuntaan kallellaan kuin mitatussa suuntakuviossa. Antennin todellinen pääkeila ei siis ole niin elliptinen kuin mitattiin ja ellipsi saattaa olla eri suuntaan kallellaan.

6.4.3 Kompaktin antennimittauspaikan mittaustarkkuuden parantaminen

Mittaustarkkuuden parantaminen vaatii vielä mittausmenetelmien kehittämistä. Hiljaisen alueen laadun selvittämiseksi kannattaa mitata useita leikkauksia hiljaisesta alueesta. Leikkausten perusteella voidaan parantaa mittaustaikaa ja arvioida mittaustarkkuutta. Koko hiljaisen alueen näytteistäminen kahdessa ulottuvuudessa ei kuitenkaan kannata pelkän mitatun suuntakuvion korjaamisen vuoksi, koska lähes yhtä hyvin voitaisiin tehdä lähikenttämittaus. Tosin leikkausten tasomaisuuden mittaaminen lähikenttämittauksessa on hankalampaa, koska näytteenottoantenni on hyvin lähellä mitattavaa antennia. Suuntakuvion korjaaminen mitatun hiljaisen alueen perusteella edellyttää myös antennin säteilykuvion vaiheen mittaamista. Lupaavin tapa tarkentaa mittaustuloksia on NAPC-menetelmä. Tämäkin edellyttää antennin säteilykuvion vaiheen mittaamista. Lisäksi suuntakuvio on mitattava useaan kertaan eri kohdissa mittaustaikaa. Mittauksilla aika- tai taajuusalueessa voidaan poistaa heijastusten aiheuttamia häiriöitä. Tämän työn perusteella eniten hiljaisen alueen laatuun vaikuttaa hologrammista tulevat häiriöt, joita ei aika- tai taajuusalueen mittauksilla voida poistaa.

7 Yhteenveto

Satelliittiantennien toiminta tulisi varmentaa sähköisten toiminnallisten mittausten avulla. Kompakti antennimittauspaikka soveltuu parhaiten suurten millimetri- ja alimillimetriaaltoalueen antennien testaamiseen. Heijastimeen perustuvassa kompaktissa antennimittauspaikassa suurinta käyttötaajuutta rajoittaa heijastimen pintatarkkuus. Hologrammiin perustuva kompakti antennimittauspaikka on parempi alimillimetriaaltotaajuuksilla, koska hologrammin tarkkuusvaatimus on lievempi kuin heijastimen ja se on edullisempi valmistaa.

Mitä korkeampi on taajuus, sitä suurempia ovat antennimittauspaikan virheet, kuten hologrammin tai peilin pinnan vääristymät aallonpituuteen verrattuna. Suuremmat virheet aallonpituuteen nähden taas aiheuttavat suuremman epävarmuuden mittaus-tuloksiin. Alimillimetriaaltoalueen mittauspaikan laadun on oltava hyvä, koska alimillimetriaaltotaajuuksilla toimivat antennit ovat yleensä erittäin suuntaavia ja mitä suuntaavampaa antennia mitataan, sitä vähemmän häiriöitä mittauspaikassa saa olla. Häiriöitä mittauspaikkaan aiheutuu esimerkiksi ympäristön heijastuksista, diffraktiosta ja hologrammin epäideaalisuuksista. Tässä työssä tutkittiin kompaktiin antennimittauspaikkaan kehitettyjen häiriöiden tunnistus- ja korjausmenetelmien sopivuutta millimetri- ja alimillimetriaaltoalueelle. Häiriösignaalien tunnistaminen kompaktissa antennimittauspaikassa on mahdollista esimerkiksi näytteistämällä hiljaisen alueen kenttä ja laskemalla tästä mittauspaikan suuntaspektri Fourier-muunnoksen tai MUSIC-algoritmin avulla. Häiriöiden vaikutuksen vähentäminen jo mitatusta suuntakuvioista sen sijaan on erittäin haastavaa. Parhaiten häiriöiden vaikutuksen vähentämiseen mitatussa suuntakuviossa sopinee NAPC-menetelmä. Menetelmässä tutkittavan antennin suuntakuviota on mitattava vähintään kolmessa kohdassa hiljaista aluetta. Mittauskohtien välinen etäisyys on tiedettävä tarkasti.

Työssä tutkittiin hiljaisen alueen kentän epäideaalisuuksien vaikutusta antennin mitattuun suuntakuviotaan. Hiljaisen alueen kentän vaatimukset riippuvat tutkittavasta antennista ja halutusta mittaustarkkuudesta. Numeerisen tutkimuksen perusteella voidaan helposti ennustaa, miten tietynlainen hiljaisen alueen epäideaalisuus muuttaa antennin mitattua suuntakuviota. Hiljaisen alueen amplitudissa oleva kupu madaltaa mitatun suuntakuvion sivukeiloja ja leventää pääkeilaa. Hiljaisen alueen amplitudissa oleva kuoppa puolestaan kaventaa pääkeilaa, mutta nostaa sivukeiloja. Hiljaisen alueen amplitudissa oleva porras, samoin kuin vaiheessa oleva kupu tai kuoppa täyttää lähinnä antennin mitatun suuntakuvion ensimmäisiä minimejä. Jos hiljainen alue muuttuu tasaisesti erisuuntaisten leikkausten välillä, voidaan hiljaisen alueen yhden suuntaisen

leikkauksen vaikutusta arvioida samansuuntaiseen mitatun suuntakuvion leikkaukseen kerrallaan. Jos esimerkiksi hiljaisen alueen vaakasuuntaisen leikkauksen amplitudissa on kupu ja pystysuuntaisen leikkauksen amplitudissa kuoppa, on antennin mitattu pääkeila leventynyt vaakasuunnassa ja kaventunut pystysuunnassa.

Työssä arvioitiin myös alimillimetriaaltoalueella toimivan ADMIRALS RTO-antennin mittauksia hologrammiin perustuvassa kompaktissa antennimittauspaikassa. Häiriösignaaleja etsittiin säteenseurantaan perustuvan ohjelman avulla ja laskemalla suuntaspektri hiljaisen alueen kentän vaakasuuntaisesta leikkauksesta. Selviä pääkeilan lähellä olevia häiriösignaaleja ei löydetty ja todennäköisesti hologrammi vaikuttaa enemmän hiljaisen alueen laatuun kuin ympäristön heijastukset. Hiljaisesta alueesta mitattujen leikkausten perusteella hiljaisen alueen amplitudivaihtelu huipusta huippuun oli noin 2 dB ja vaihevaihtelu huipusta huippuun noin 140° antennin apertuurin alueella. Tällainen epäideaalinen hiljainen alue muutti simuloidun suuntakuvion pääkeilaa enimmillään noin 3 dB ja sivukeiloja enemmän. Epäideaalisen hiljaisen alueen vaikutuksesta simuloitu suuntakuvio muuttui enemmän mitatun suuntakuvion näköiseksi. Erityisen hyvin tämä näkyi kaksikulotteisista suuntakuvioista. Mitatun suuntakuvion pääkeila oli ellipsin muotoinen. Epäideaalisen hiljaisen alueen vaikutuksesta myös simuloidun suuntakuvion pääkeila muuttui elliptimäisemmäksi. Epäideaalinen hiljainen alue ei selitä kaikkia eroja simuloidun ja mitatun suuntakuvion välillä.

Hologrammiin perustuvassa alimillimetriaaltoalueen kompaktissa antennimittauspaikassa hologrammi aiheuttaa suurimmat virheet hiljaiseen alueeseen ja siksi hologrammin valmistus- ja suunnittelumenetelmiä on kehitettävä. Ympäristöstä heijastuvat häiriöt voidaan tunnistaa esimerkiksi mittaamalla hiljainen alue ja laskemalla siitä suuntaspektri. Tunnistetut häiriöt voidaan poistaa esimerkiksi lisäämällä vaimennusmateriaalia mittauspaikkaan. Kaikkia häiriöitä ei kuitenkaan saada poistettua mittauspaikasta, ja jäljelle jääneiden häiriöiden vaikutusta voidaan vähentää erilaisin menetelmin. Lupaavin menetelmä alimillimetriaaltoalueen antennimittauspaikkaan on NAPC-menetelmä.

Lähdeluettelo

- [1] J. Ala-Laurinaho, J. Häkli, T. Koskinen, A. Lönnqvist, J. Mallat, S. Ranvier, A. V. Räisänen, J. Säily, J. Tuovinen, V. Viikari, "Tests of the ADMIRALS antenna in a hologram compact antenna test range", *Proceedings of XXVIII National Convention on Radio Science and IV Finnish Wireless Communication Workshop*, 2003, Oulu, Suomi, s. 263–266.
- [2] J. Hartmann, J. Habersack, H.-J. Steiner, Th. Rose, P. Zimmermann, "Transmit and receive modules for measurement of future space applications in the terahertz frequency range", *Proceedings of the 23rd Annual Meeting & Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*, 2001, s. 171-176.
- [3] P. S. Hacker, H. E. Schrank, "Range distance requirements for measuring low and ultralow sidelobe antenna patterns", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-30, No. 5, 1982, s. 956-966.
- [4] J. Tuovinen, "Methods for testing reflector antennas at THz frequencies", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 35, No. 6, 1993, s. 7-13.
- [5] A. Lehto, A. Räisänen, *Mikroaaltomittaustekniikka*, Otatieto, Helsinki, 2001, 215 s.
- [6] P. R. Foster, D. Martin, C. Parini, A. Räisänen, J. Ala-Laurinaho, T. Hirvonen, A. Lehto, T. Sehm, J. Tuovinen, F. Jensen, K. Pontoppidan, Mmwave antenna testing techniques – Phase 2, *MAAS Report 304*, Issue No. 2, ESTEC Contract No 11641/95/NL/PB(SC), 1996, 224 s, s. 6-3 – 6-4.
- [7] A. D. Olver, "Compact antenna test ranges", *Proceedings of the 7th International Conference on Antennas and Propagation*, Vol. 1, 1991, s. 99-101.
- [8] T. Koskinen, *Hologrammin simulointi*, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2001, 77 s.
- [9] A. Sihvola, I. Lindell, *Sähkömagneettinen kenttäteoria 2. Dynaamiset kentät*, Otatieto, Helsinki, 2000, 200 s.
- [10] A. Räisänen, A. Lehto, *Radiotekniikka*, Otatieto, Helsinki, 1999, 280 s.

- [11] "IEEE standard definitions of terms for antennas", *IEEE Standard 145-1993*, 1993.
- [12] J. Häkli, *Design of a dual reflector feed system for a hologram compact antenna range*, Lisensiaatitutkimus, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 2002, 108 s.
- [13] J. van Norel, V. J. Vokurka, "Novel APC-methods for accurate pattern determination", *Proceedings of the 15th Annual Meeting & Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*, 1993, s. 385-389.
- [14] H. D. Griffiths, F. Roosen, "Evaluation of anechoic chamber wavefront quality using superresolution techniques", *Proceedings of the 7th International Conference on Antennas and Propagation*, Vol. 2, 1991, s. 934-937.
- [15] S. V. Häggman, *Signaalit ja järjestelmät*, Opetusmoniste, Teknillinen korkeakoulu, 2001.
- [16] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-34, No. 3, 1986, s. 276-280.
- [17] A. van der Merwe, D. J. Rensburg, "Main-beam reduction for compact range imaging", *IEE Proceedings –Microwaves, Antennas, Propagation*, Vol. 141, No. 6, 1994, s. 461-463.
- [18] J. C. Bennet, A. Griziotis, "Removal of environmental effects from antenna radiation patterns by deconvolution processing", *Proceedings of the IEE Conference*, Pub. 219, Pt. 1, 1983, s. 224-228.
- [19] G. Evans, "Far field correction for short ranges", *Proceedings of the 7th Annual Meeting & Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*, 1985, s. 34-1 – 34-9.
- [20] J. Appel-Hansen, "Reflectivity level of radio anechoic chambers", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-21, No. 4, 1973, s. 490-498.
- [21] J. van Norel, A. H. van Gastel, V. J. Vokurka, J. Neve, J. F. Coroller, "Application of flexible scanning in advanced APC-techniques", *Proceedings of the 16th Annual Meeting & Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*, 1994, s. 411-415.

- [22] C. A. Corral, J. R. Jones, J. Petz, "Practical issues in advanced antenna pattern comparison", *Proceedings of the 18th Annual Meeting & Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*, 1996, s. 33-38.
- [23] W. D Burnside, I. J. Gupta, "A method to reduce signal errors in antenna pattern measurements", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 42, No. 3, 1994, s. 399-405.
- [24] D. A. Leatherwood, E. B. Joy, "Plane wave, pattern subtraction, range compensation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 49, No. 12, 2001, s. 1843-1851.
- [25] D. A. Leatherwood, E. B. Joy, "Range-field plane wave model determined from spherical probing data", *Proceedings of the 19th Annual Meeting & Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*, 1997, s. 170-175.
- [26] D. N. Black, Jr., E. B. Joy, "Test zone field compensation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 43, No. 4, 1995, s. 362-368.
- [27] A. M. Predoehl, W. L. Stutzman, "Implementation and results of a time-domain gating system for a far-field range", *Proceedings of the 19th Annual Meeting & Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*, 1997, s. 8-12.
- [28] J. Säily, P. Eskelinen, A. V. Räisänen, "Pilot signal based real-time measurement and correction of phase errors caused by microwave cable flexing in planar near-field tests", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 51, No. 2, 2003, s. 195-200.
- [29] P. Hannula, *Hologrammiin perustuvan kompaktin antennimittauspaikan heijastavuustason minimointi*, Erikoistyö, Radiolaboratorio, Teknillinen korkeakoulu, 2002, 28 s.
- [30] J. Ala-Laurinaho, J. Säily, T. Koskinen, J. Häkli, A. Lönnqvist, J. Mallat, A. Räisänen, J. Tuovinen, V. Viikari, Submillimetre wave antenna testing using a hologram CATR, *Task Report 5: Antenna Measurement with a hologram CATR*, Estec contract no. 13096/98/NL/SB, Contract change notice 1, 2003, 25 s.
- [31] J. Häkli, Radiolaboratorio, TKK, Henkilökohtainen kommunikointi, Joulukuu 2003.